

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

**HALJASKATUSTE GAASIVOO SÕLTUVUS KATUSE TÜÜBIST JA  
VANUSEST**

Kert Keller

Juhendaja: Alar Teemusk, PhD

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

**Tartu 2017**

## HALJASKATUSTE GAASIVOO SÕLTUVUS KATUSE TÜÜBIST JA VANUSEST

Haljaskatused aitavad linnakeskkondades leevendada mitmeid rohe- ja haljasalade osakaalu vähenemisest tingitud negatiivseid keskkonnamõjusid. Haljaskatused seovad linnaõhust saasteaineid, CO<sub>2</sub> ning potentsiaalselt ka teisi kasvuhoonegaase. Käesoleva töö eesmärgiks oli hinnata, kuidas mõjutavad haljaskatused potentsiaalselt ümbritsevate alade kasvuhoonegaaside bilanssi ning milline mõju on kasvuhoonegaaside voogudele haljaskatuse tüübil ja vanusel. Uuringusse kaasati neliteist erinevat tüüpi ja erinevas vanuses haljaskatust ning üks looduslik võrdlusala. Katused jaotati kolme klassi. Oluline mõju kasvuhoonegaaside voogudele oli katuse tüübil, sealhulgas substraadikihi paksusel, kuid katuse vanusel olulist efekti ei tuvastatud. Kuigi mõõtealade puhul ületas ökosüsteemi hingamine süsihappegaasi sidumise, oli suurem osa mõõtealadest siiski negatiivse globaalse soojenemise potentsiaaliga (GWP). Kaks katusetüüpi kolmest käitusid metaani sidujatena, kolmanda puhul olid vood nullilähedased. N<sub>2</sub>O vood olid kõikide katusetüüpide puhul minimaalsed, üksikud kõrgemad N<sub>2</sub>O emissioonid olid seotud vihmasadudega.

T270 – Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

kasvuhoonegaasid, linnakeskkond, süsiniku sidumine, GWP

## INFLUENCE OF ROOF TYPE AND AGE ON GREENHOUSE GAS FLUXES FROM GREEN ROOFS

Green roofs help to mitigate the negative environmental effects caused by the loss of vegetated areas in urban environments. Green roofs help to reduce air pollution, sequester CO<sub>2</sub> and potentially other greenhouse gases. The aim of this study was to evaluate if roof type and age have an effect on greenhouse gas fluxes from green roofs. The secondary objective was to find out how green roofs affect the balance of greenhouse gases in the surrounding area. Fourteen existing green roofs of various ages were included in this study as well as a natural reference area. The roofs were divided into three groups. The gas fluxes from green roofs were in strong correlation with roof type, the age of the roof had no significant effect. Although ER exceeded NEE, the global warming potential (GWP) was negative for most sites. Two out of three green roof groups were net sinks for methane, for the third group the flux was near zero. N<sub>2</sub>O emissions for all roof types were insubstantial, peaks of N<sub>2</sub>O coincided with larger rain events.

T270 – Environmental technology, pollution control

greenhouse gas fluxes, urban environment, carbon sequestration, GWP

## Sisukord

SISSEJUHATUS .....	5
1. Teoreetiline osa.....	6
1.1. Haljaskatuste mõiste ja liigitus .....	6
1.2. Haljaskatuste kihid .....	7
1.3. Haljaskatuste ajaloost .....	9
1.4. Haljaskatuste kasulikud omadused .....	11
2. Protsesside kirjeldus ja maailmas läbiviidud uuringud .....	14
2.1. Kasvuhoonegaaside vood linnakeskkonnas.....	14
2.2. Kasvuhoonegaaside mõõtmised haljaskatustelt.....	17
3. Materjal ja metoodika.....	20
3.1. Mõõtmisalade kirjeldus .....	20
3.1.1. Matipõhised haljaskatused.....	20
3.1.2. Kergkruusapõhised haljaskatused.....	21
3.1.3. Mullapõhised haljaskatused.....	23
3.1.4. Naage võrdlusala .....	26
3.2. Välitööde metoodika .....	26
3.2.1. Kasvuhoonegaaside ja CO <sub>2</sub> mõõtmine .....	26
3.2.2. Täiendavad mõõtmised ja analüüsid .....	27
3.2.3. Statistiline andmeanalüüs .....	29
4. Tulemused .....	30
4.1. Mõõtmised staatilise suletud kambri meetodil .....	30
4.1.1. Mõõtmisalade CO <sub>2</sub> vood .....	30
4.1.2. Mõõtmisalade CH <sub>4</sub> vood .....	33
4.1.3. Mõõtmisalade N <sub>2</sub> O vood .....	37
4.2. Mõõtmised dünaamilise suletud kambri meetodil.....	41
4.3. Substraadiproovide gaasivood.....	47
4.4. Gaasivoogude seosed ilmaandmete ja muude parameetritega.....	48
5. Arutelu.....	50
5.1. Mõõtmised staatilise suletud kambri meetodil .....	50
5.1.1. Mõõtmisalade CO <sub>2</sub> vood .....	50
5.1.2. Mõõtmisalade CH <sub>4</sub> vood .....	52
5.1.3. Mõõtmisalade N <sub>2</sub> O vood .....	53

5.2. Haljaskatuste süsiniku bilanss mõõtmisperioodil.....	55
5.3. Mõõtmisalade globaalse soojenemise potentsiaal (GWP).....	57
Kokkuvõte .....	58
Summary .....	60
Tänuavaldused.....	62
Kasutatud allikad.....	63
Lisa 1. Uurimuses käsitletud haljaskatused ja kontrollala.....	72
Lisa 2. Mõõtmisalade taimede osakaalud.....	80
Lisa 3. Komposiitproovi mullakeemia tulemused.....	81
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	82

## SISSEJUHATUS

Ulatusliku ehitustegevuse tõttu on linnakeskkondades haljas- ja rohealade osakaal pidevalt vähenemas, tuues kaasa mitmeid negatiivseid keskkonnamõjusid. Haljaskatuste rajamist linnakeskkondadesse on peetud üheks potentsiaalseks lahenduseks nimetatud probleemile. Haljaskatused aitavad leevendada soojussaare efekti, parandada hoonete energiatõhusust, vähendada üleujutuste ohtu suurvihmade perioodil ning luua esteetilisemat elukeskkonda (Getter & Rowe, 2006). Haljaskatused aitavad puhastada ka linnaõhku, sidudes mitmesuguseid tahkeid ja gaasilisi saasteaineid nagu  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  (Speak et al., 2012; Yang et al., 2008). Samuti on mitmete uuringute tulemusel leitud, et haljaskatused seovad atmosfäärset  $CO_2$ , mida peetakse üheks oluliseimaks kasvuhoonegaasiks (Agra et al., 2017; Ismail et al., 2012; Li et al., 2010).

Käesoleva magistritöö põhieesmärgiks on erinevat tüüpi ja erinevas vanuses haljaskatuste kasvuhoonegaaside voogude võrdlemine omavahel ning loodusliku paepealsel mullal asuva kontrollalaga, selgitamaks looduslikule alale kõige lähedasem katusetüüp. Samuti on üheks magistritöö eesmärgiks hinnata, kuidas võivad erinevat tüüpi haljaskatused läbi kasvuhoonegaaside sidumise või emiteerimise mõjutada piirkonna kasvuhoonegaaside bilanssi.

Magistritöö valimisse kuulus neliteist erinevat tüüpi ning erineva vanusega haljaskatust üle Eesti, mis jaotati substraadikihi ja taimkatte alusel kolme klassi: matipõhised haljaskatused, kergkruusapõhised haljaskatused ning mullapõhised haljaskatused. Võrdlusena kaasati mõõtealade valimisse looduslik õhukesel paepealsel mullal asuv kontrollala.

Käesoleva magistritöö hüpoteesid on järgnevad:

1. Loodusliku kontrollalaga võrreldes on süsihappegaasi ( $CO_2$ ) vood suurimad mullapõhistel haljaskatustel, keskele jäävad kergkruusapõhised haljaskatused ning väikseimad vood on matipõhistel haljaskatustel.
2. Mullapõhised haljaskatused käituvad metaani ( $CH_4$ ) oksüdeerijatena, teiste katusetüüpide puhul on vood nullilähedased.
3. Naerugaasi ( $N_2O$ ) haljaskatuste gaasivoos ei esine.
4. Haljaskatuste gaasivoog ei sõltu katuse vanusest, olulisem on substraadikihi paksus.
5. Kõik valimisse kuuluvad haljaskatused toimivad  $CO_2$  sidujana.

# 1. Teoreetiline osa

## 1.1. Haljaskatuste mõiste ja liigitus

Katusehaljastuseks nimetatakse hoone või ehitise katusekatet, mis koosneb kergkruusal, mullal või nende segul põhinevast kasvukihist ning sellel kasvavast taimestikust. Üldlevinud eestikeelseks mõisteks on “murukatus”, mis võib olla eksitav, sest sageli kasvavad katusel muru asemel mitmesugused õistaimede liigid. Hästi sobib mõiste “haljaskatus”, kuid sobilikud on ka “rohukatus”, “rohekatus” või “taimkatus” (Teemusk, 2005).

Enamlevinud käsitlemise järgi jaotatakse haljaskatused kasvukihi tuseduse, taimestiku, ehitusmaterjalide kasutuse, hooldamise ning kasutusotstarbe alusel kahte põhiklassi (Berardi et al., 2014; Berndtsson, 2010; Oberndorfer et al., 2007; Liu & Baskaran, 2005):

- Ekstensiivset tüüpi haljaskatused – valdavalt õhukese kasvukihiga, mille paksus jääb enamasti alla 200 mm ning katusele avaldatav lisakoormus jääb vahemikku 60 – 150 kg/m<sup>2</sup>. Reeglina ei ole seda tüüpi katused käidavad ning ei vaja kastmist ega hooldamist. Taimedeks on enamasti madalakasvulised ning vähenõudlikud liigid, näiteks kukeharjad. Tänu väiksemale kaalule ning rajamise tehnilisele lihtsusele sobib ekstensiivne katusehaljastus suure pindalaga ning ka kaldega katustele.
- Intensiivset tüüpi haljaskatused – enamasti tuseda kasvukihiga, mille paksus ületab 200 mm ning katusele avaldatav lisakoormus on üle 300 kg/m<sup>2</sup>. Tulenevalt suurest kaalust võib rajamiseelne kandekonstruktsioonide tugevdamine olla vajalik. Tänu substraadikihi paksusele on taimestik mitmekesine ning katusel võivad kasvada ka põõsad ja väiksemad puud. Intensiivsed haljaskatused on sageli käidavad ning vajavad suurema kasvuga taimestiku tõttu rohimise, kastmise ning väetamise näol pidevat hooldamist.

Tihti peale on keeruline tõmmata ekstensiivse ja intensiivse katusetüübi vahele selget piiri ning seetõttu on mitmed autorid välja toonud ka kolmanda haljaskatuste tüübi, mida võiks eesti keeles nimetada vähese intensiivsusega haljaskatusteks. Omadustelt jääb vähese intensiivsusega haljaskatus ekstensiivse ja intensiivse katusetüübi vahele. Taimedest on levinud

madalad rohttaimed ja puhmad. Võrreldes ekstensiivse haljaskatusega on taimkate mitmekesisem ja ulatuslikum ning katus vajab seetõttu regulaarselt hooldamist (Vijayaraghavan, 2016; Theodosiou, 2009; Yang et al., 2008).

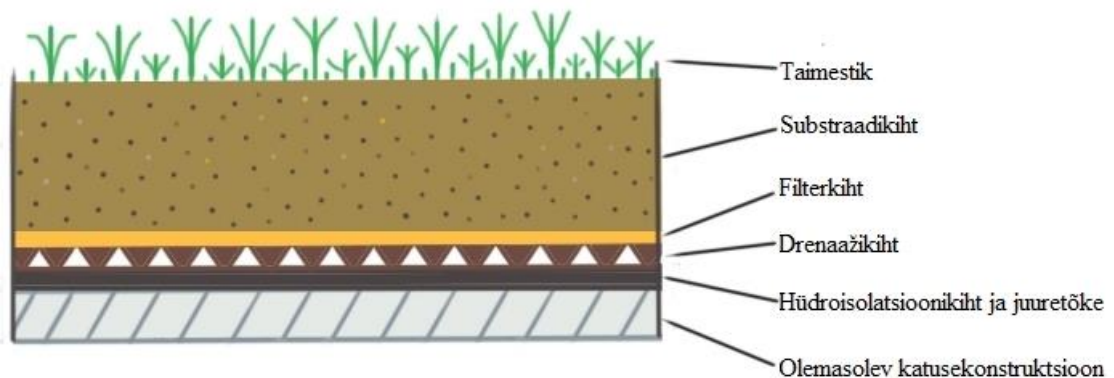
## **1.2. Haljaskatuste kihid**

Tüüpiliselt koosnevad haljaskatused järgnevatest kihtidest (Joonis 1) (Vijayaraghavan, 2016; McIntyre & Snodgrass, 2010; Oberndorfer et al., 2007):

1. Hüdrolatsioonikiht – haljaskatuse kõige alumine kiht, mis kaitseb aluskatust niiskuse eest ja aitab vältida lekkeid. Kvaliteetne ning korrektselt paigaldatud hüdrolatsioonikiht on olulise tähtsusega, sest haljaskatuse kasvukihi niiskussisaldus on suur ning lekke korral tuleb selle tuvastamiseks ning parandamiseks eemaldada kõik haljaskatuse kihid. Veekindluse saavutamiseks kasutatakse enamasti polüvinüülkloriidil (PVC), kummil, termoplastilisel polüolefiinil (TPO) ja teistel materjalidel põhinevaid ühekihilisi kattematerjale, ruberoidi, modifitseeritud bituumenit või erinevaid vedelalt peale kantavaid tooteid. Peale veekindla membraani võib hüdrolatsioonikiht sisaldada ka juuretõket, vältimaks võimalikke kahjustusi taimejuurte poolt ning sellega kaasnevat ohtu katuse veepidavusele.
2. Drenaažikiht – asub hüdrolatsioonikihi peal ning võimaldab üleliigselt veel katuselt ära voolata, vältides niimoodi liigniiske ja hapnikuvaese keskkonna tekkimist substraadikihis. Peamiselt kasutatakse drenaažikihis jämeda fraktsiooniga materjale nagu kergkruus, killustik ja purustatud tellised või spetsiaalseid drenaažimatte. Drenaažimatid, mis on enamasti valmistatud polüetüleenist või polüstüreenist, sisaldavad sageli taimedele lisaniiskuse säilitamiseks ka väikeseid süvendeid või reservuaare.
3. Filterkiht – filterkiht eraldab substraadikihti drenaažikihist ning aitab vältida selle ummistumist. Enamasti kasutatakse filterkihina geotekstiili, mille pooride suurus on piisavalt väike, et võimaldada vee takistuseta liikumist läbi kihi, kuid samas ära hoida peente osakeste sattumist drenaažikihti.
4. Substraadikiht – kasvusubstraadi koostis sõltub väga palju haljaskatuse tüübist ning taimestikust. Intensiivsed haljaskatused, kus kasvavad suuremakasvulised taimeliigid,

vajavad teistsuguste omadustega ning koostisega substraati kui vähenõudlike sukulentidega haljastatud ekstensiivsed katused. Kasvusubstraat peab olema kergekaaluline, füüsikaliselt ja keemiliselt stabiilne, hästi õhustatud ja drenitud, vastupidav tihenemisele ning tagama taimedele piisavas koguses vee ja toitainete kättesaadavuse. Ekstensiivsete katuste puhul peaks kasvusubstraat mahuliselt koosnema 80% ulatuses jämeda fraktsiooniga kergekaalulistest mineraalsetest agregaatidest, näiteks kergkruusast, pimsist või purustatud tellistest. Orgaaniline materjal peaks moodustama substraadi mahust ligikaudu 10–20%.

5. Taimestik – kasvutingimused katusel on taimede jaoks keerulised. Katusehaljastuseks sobilikud taimed peavad toime tulema toitainetevaeses keskkonnas ning olema vastupidavad ekstreemsetele temperatuuridele, pidevale tuulele, põuaoludele ja intensiivsele päikesekiirgusele. Taimed peaksid moodustama pinnalähedase juurestiku, mis aitaks substraadikihti siduda ning vältida tuuleerosiooni. Samuti peaksid taimed olema piisavalt suure lehepinnaga, et varjutada kasvukihti otsese päikesekiirguse eest ning takistada seeläbi umbrohuseemnete idanemist.



**Joonis 1.** Läbilõige tavapärase haljaskatuse kihtidest.



### 1.3. Haljaskatuste ajaloost

Varaseimad teadaolevad näited katuseaedade rajamisest olid tänapäeva Iraagi aladel asunud Babüloni rippaiad, mis ehitati hinnanguliselt 2600 aastat tagasi kuningas Nebukadnetsar II käsul. Rippaiad koosnesid arvukatest terrassidest, mis toetusid tellistest laotud võlvidele ning terrasside peale olid istutatud puud (Grant, 2006). Roomlased istutasid mitmete avalike hoonete katustele samuti puid. Näited sellistest hoonetest on keisrite Hadrianuse ning Augustuse mausoleumid (Peck et al., 1999). Tõendeid katusehaljastuse kasutamisest on leitud ka Vesuuvi poolt tuha alla maetud Pompei linna varemetest, kus sammaskäikude kohal olevad terrassid kaeti taimestikuga pakkumaks kuumadel päevadel varju ning jahedust (Grant, 2006).

Kaitseks vihma ja tuule eest kasutasid viikingid Skandinaavia jahedas kliimas palkmajade seinte ning katuse vooderdamiseks murumättaid. Newfoundlandi saarelt ning Nova Scotia provintsist leitud viikingite stiilis majad annavad tunnistust, et selline ehitusstiil jõudis ka Põhja-Ameerikasse (Peck et al., 1999). Murumätaste kasutamine katusekattena on ka tänapäeval mitmel pool Põhjamaades levinud, näiteks Islandil, Fääri saartel ning Norras (Magill et al., 2011).

Keskajal rajasid benediktiini mungad oma kloostritesse katuseaedu (Magill et al., 2011). Üheks näiteks on Mont-Saint-Micheli klooster Prantsusmaal, mis taastati tulekahujärgselt 13. sajandil. Kloostri majutusruumide peal asuvate ristikäikude keskel on hekiga ümbritsetud muruplats, kus kasvavad mitmesugused rohttaimed (Grant et al., 2003).

Renessanssiajastu üks esimesi katusehaljastusega hooneid on Palazzo Piccolomini, mis ehitati 15. sajandi teisel poolel paavst Pius II suveresidentsiks. Hoone asub Pienza linnas, Itaalias ning on ka tänapäeval säilinud, kuigi mitte täiesti algupärasel kujul. Lõunasuunaline katuseaed on rajatud hobusetallide kohale ning ümbritsetud kolmest küljest kõrgete müüridega. Katuseaias kasvavad põõsad ja loorberi- ning viljapuud, samuti on seal lillepeenrad ja purskkaev (Grant, 2006). Renessanssiperioodi kõrgeim katuseaed paikneb Toscana maakonnas Lucca linnas asuva Guinigi torni tipus. Punastest tellistest üle 40 meetri kõrguse torni tipus kasvavad iilekstammed (Grant et al., 2003).

Itaalia renessanssiajastu katuseaedade näitel rajati katuseaedu ka Moskva tsaaririiki. Kremli kõrvuti paiknevatele katustele rajati 1680. aastatel kuue hektari suurune katuseaed, mis hilisemate renoveerimistööde käigus eemaldati. Katuseaias kasvasid põõsad ja viljapuud, samuti rajati sinna tiik ning purskkaevud. Itaalia päritolu arhitekt Rastrelli lasi 1764. aastal

Katariina II tellimusel rajada Ermitaaži katuseaia, mis on kasutuses ka tänapäeval. Katuseaeda rajati jalgteed, muruplatsid ning istutati väiksemaid puid (Grant, 2006).

Tänapäeval levinud katusehaljastuse tehnoloogia sai alguse 1880. aastatel Saksamaalt. Kiire linnastumise tingimustes kasutati hoonete katustel odava hüdroisolatsioonikihina tõrva, mis muutis katused aga tuleohtlikuks. Tuleohu vähendamiseks kaeti katused liiva ning killustiku seguga, kus hakkasid aja jooksul sinna sattunud seemnetest kasvama taimed (Magill et al., 2011). 19. sajandi lõpuks olid haljaskatused saanud üldtuntud osaks Berliini linnast. 20. sajandi alguses propageerisid katusehaljastuse rajamist tuntud arhitektid Le Corbusier, Frank Lloyd Wright ja Roberto Burle Marx. Kuulsaimad näited 1930. aastatest pärinevatest katusehaljastusega hoonetest on Rockefeller Center New Yorgis ning kaubamaja Derry & Toms Londonis (Grant et al., 2003).

1960. aastate alguses asusid mitmed riigid, eesotsas Saksamaa ja Šveitsiga katusehaljastuse tehnoloogiat edasi arendama. 1970. aastatel tehti hulgaliselt uurimistööd mitmete haljaskatuste komponentide kohta, sealhulgas juuretõkke, hüdroisolatsioonimaterjalide, drenaaži- ja kasvukihi ning taimede kohta (Peck et al., 1999). Kuigi katusehaljastusega tegelevad ettevõtted olid Saksamaal olemas juba 1950. aastate lõpus, muutusid haljaskatused alles 1970. aastatel tavapäraseks osaks linnapildist. Järgnevatel aastakümnetel kasvas katusehaljastusega tegeleva tööstusharu osakaal kiiresti ja hakkas levima ka mujal Euroopas ning Põhja-Ameerikas (Grant et al., 2003). Katusehaljastust soosiva seadusandluse väljatöötamine ning omavalitsuste poolt makstavad toetused aitasid oluliselt Saksamaal haljaskatuste populaarsust suurendada. Kui 1989. aastal oli riigi haljaskatuste kogupindala üks miljon ruutmeetrit, siis 1996. aastaks oli see kasvanud kümnekordseks (Peck et al., 1999). Nüüdisajal rajatakse Saksamaal igal aastal hinnanguliselt 13,5 miljonit ruutmeetrit haljaskatuseid (Oberndorfer et al., 2007).

Saksamaa näitel on ka teised Euroopa riigid asunud katusehaljastuse rajamist soosivat seadusandlust ja erinevaid toetuste süsteeme välja töötama ning haljaskatuste paigaldamisest, hooldamisest ning taimede ja muude ehitusmaterjalidega varustamisest on nüüdseks saanud uus tööstusharu (Peck et al., 1999).

## 1.4. Haljaskatuste kasulikud omadused

Peale esteetilise väärtuse on haljaskatustel ka mitmeid teisi kasulikke omadusi, mis on eriti olulised just linnapiirkondades. Järgnevalt on välja toodud mõned tähtsamad neist.

Soojussaare efekti tulemusena on õhutemperatuur linnapiirkondades kõrgem kui linnalähedastel aladel. Linnakeskkonnas on hoonete ning mitmesuguste pindade ja struktuuride rajamisel kasutatud sageli madala peegeldumisnäitajaga ehitusmaterjale, mis salvestavad endasse päeva jooksul soojusenergiat ning kiirgavad seda õhtusel ajal tagasi linnaruumi. Selliste materjalide laialdane kasutamine koos rohealade vähesuse ning antropogeensetest allikatest pärineva soojuskiirgusega on soojussaare efekti peamisteks põhjusteks (Rizwan et al., 2008). Haljaskatused suurendavad katusepindade albeedot ning jahutavad tänu substraadikihist aurumisele ning taimestiku transpiratsioonile ümbritsevat õhku (Santamouris, 2014). Berardi (2016) uuris katusehaljastuse rajamisega kaasnevat jahutusefekti jalakäijate tasandil (1,8 m) ning leidis, et päevasel ajal kaasneks haljaskatuse rajamisega kuni 0,4°C temperatuurilangus ning maksimaalselt 0,8°C öösel. Sarnaseid tulemusi näitas ka Savio jt (2006) poolt New Yorgi linna kohta tehtud simulatsiooniuuring, millest järeldus, et rohttaimedel põhineva katusehaljastuse rajamine piirkonna lamekatustele suudaks keskpäevast temperatuurimaksimumi 2 m kõrgusel vähendada 0,37 – 0,86°C võrra ning päeva keskmist õhutemperatuuri 0,3 – 0,55°C kraadi võrra. Haljaskatuse potentsiaalne jahutusvõime sõltub haljastatud katusega hoone kõrgusest ning on suurem madalamate hoonete puhul. Kui hoone kõrguse ning tänava laiuse suhtarv on suurem kui 1, on haljaskatuse potentsiaalne jahutusefekt madal (Ng et al., 2012). Oluline mõju on ka katuse taimestiku lehepinnaindeksil (LAI – *leaf area index*), mis väljendab lehepinna suurust ühe maapinna ühiku kohta. Suurema lehepinnaindeksiga kaasneb ka suurem potentsiaalne jahutusefekt (Berardi, 2016).

Kütte- ja jahutusvajadus moodustab hoone energiatarbest 18 – 73% (Ürge-Vorsatz et al., 2015). Haljaskatused vähendavad temperatuurikõikumisi hoone siseruumides ning aitavad seeläbi vähendada hoone energiakulu nii jahedas kui ka soojemas kliimas (Berardi et al., 2014). Tihe taimkate ning substraadikiht toimivad üheskoos soojusisolatsioonikihina ning kaitsevad aluskatust temperatuurikõikumiste eest. Umbes 10 cm paksune substraadikiht on piisav, et vähendada märkimisväärselt katust läbivat soojusvoogu (Jim & Tsang, 2011). Võrreldes tavakatusega väheneb katust läbiv soojusvoog 50% võrra ning aluskatuse temperatuur püsib suvepäeval kuni 30°C jahedam (Onmura et al., 2001). Spala jt (2008) uuringu kohaselt

vähendas büroohoonele rajatud katusehaljastus suveperioodil kogu hoone jahutuskooormust 15 – 39% ning katusealuste ruumide puhul kuni 58%. Potentsiaalne hoone energiakulu vähendamine haljaskatuse poolt sõltub substraadikihi koostisest, paksusest ja niiskussisaldusest, kuid ka katuse taimeestikust ning kohaliku kliima eripäradest (Getter et al., 2011). Haljaskatuse isolatsioonivõime efektiivsust mõjutab oluliselt ka aluskatuse soojustatus. Soojustamata ning keskmise soojustusega katuste puhul on katusehaljastuse soojusisolatsiooniefekt suurim (Jaffal et al., 2012). Kreekas teostatud uuringus selgus, et katusehaljastuse rajamine soojustamata aluskatusele vähendas aasta lõikes hoone energiakulu 37 – 48% ning keskmise soojustusega aluskatuse puhul vähenes energiatarve 4 – 7%. Hästi soojustatud aluskatuse puhul vähenes hoone energiakulu vaid 2% võrra (Niachou et al., 2001).

Suurest õhutemperatuuri ööpäevasest amplituudist tingitud paisumine ja kokkutõmbumine ning pidev otsene ultraviolettkiirgus kahjustavad katuseembraani ning lühendavad selle eluiga (Getter & Rowe, 2006). Tavapärased katusekatted nagu bituumen soojenevad päeva jooksul tugevalt ning hakkavad päikese loojudes jahtuma, põhjustades suurt ööpäevast temperatuuriamplituudi. Haljaskatuse substraadikiht käitub soojusisolaatorina, mistõttu on aluskatuse soojenemine ja jahtumine oluliselt aeglasem ning ka ööpäevane amplituud väiksem. Kui suvepäeval oli bituumenkattega võrdluskatuse pinnatemperatuuri amplituud keskmiselt 35,1°C, siis ekstensiivse haljaskatuse puhul oli temperatuuriamplituud 100 mm sügavusel substraadikihis 13,8°C. Kogu suveperioodi keskmine amplituud haljaskatuse substraadikihis oli 7°C ning võrdluskatusel 21°C (Teemusk & Mander, 2009).

Katusepinnad moodustavad linnakeskkonnas ligikaudu 40 – 50% vett mitteläbilaskvatest pindadest (Dunnett & Kingsbury, 2004). Haljaskatused aitavad suurvihmade ajal vähendada koormust linna kanalisatsioonisüsteemidele, vähendades vihmavee äravooluhulka katustelt ning nihutades äravoolu tipphetke pikemale ajaperioodile. Osa pealelangevatest sademetest seotakse haljaskatuse substraadikihi pooriruumi, teine osa seotakse taimeestiku poolt ning transpireeritakse aja jooksul tagasi atmosfääri (Nagase & Dunnett, 2012). Haljaskatuse vee kinnipidamise võime sõltub substraadikihi koostisest ja paksusest, taimede liigist ja katvusest, katuse kaldest ja vanusest ning ilmastikutingimustest (Berndtsson, 2010). Inglismaal tehtud uuringu tulemused näitasid, et 80 mm substraadikihiga ekstensiivne haljaskatus suudab enne küllastuspunkti saavutamist siduda maksimaalselt 20 mm sademeid (Stovin et al, 2012). Peale küllastuspunkti saavutamist eemaldatakse üleliigne veehulk katuselt läbi drenaažikihi. Uus-Meremaal tehtud uuringu kohaselt suutis 235 m<sup>2</sup> pindalaga ekstensiivne haljaskatus üheaastase mõõteperioodi jooksul ning 1093 mm summaarse sajukoguse juures kinni pidada 66% katusele

langenud sademetest, üksikute sajukordade puhul aga keskmiselt 82% langenud sademetest (Voyde et al., 2010). Tüsedas kasvukihiga (170 mm) intensiivne haljaskatus suutis Inglismaal läbi viidud uuringus 22,3 mm sajukoguse juures kinni pidada 73,2% peale langenud sademetest ning kogu uuringuperioodi vältel keskmiselt 65,7% sademetest, mis oli betoonkattega võrdluskatusest ligi kaks korda enam (33,6%) (Speak et al., 2013).

Nii lühi- kui ka pikaajalist kokkupuudet saastunud välisõhuga on seostatud enneaegse suremuse ning oodatava eluea lühenemisega (Kampa & Castanas, 2008). Põhilisteks õhusaasteaineteks linnapiirkondades on vingugaas (CO), lämmastikoksiidid (NO<sub>x</sub>), osoon (O<sub>3</sub>), vääveldioksiid (SO<sub>2</sub>) ning tahked osakesed (PM – *particulate matter*), millest suur osa tekib fossiilsete kütuste põletamisel ning muude tööstuslike tegevuste tulemusel (Nowak, 1994). Haljaskatused aitavad puhastada linnaõhku, sidudes nii gaasilisi kui ka tahkeid saasteaineid. Speak jt (2012) uurisid nelja laialdaselt katusehaljastuseks kasutatava taime (*Agrostis stolonifera*, *Festuca rubra*, *Plantago lanceolata*, *Sedum album*) võimet siduda linnaõhust PM<sub>10</sub> osakesi. Leiti, et 50 ha katusepindade haljastamisel valge kukeharjaga (*Sedum album*), suudaksid katused siduda 0,21 tonni PM<sub>10</sub> osakesi aastas, mis moodustaks 2,3% kogu piirkonna emissioonist. Veelgi parema sidumisvõimega olid valge kastehein (*Agrostis stolonifera*) ja punane aruhein (*Festuca rubra*), mis suudaksid sama pindala juures siduda 9,8 – 17,5% piirkonna aastasest PM<sub>10</sub> emissioonist. Ameerika Ühendriikides Chicagos tehtud uuring näitas, et linna rajatud 71 haljaskatust kogupindalaga 19,8 ha, suutsid 11-kuulise mõõteperioodi jooksul linnaõhust siduda 1675 kg saasteaineid, millest 52% moodustas O<sub>3</sub>, 27% NO<sub>2</sub>, 14% PM<sub>10</sub> osakesed ning 7% SO<sub>2</sub> (Yang et al., 2008).

Liikluspõhine on Euroopa linnades põhiliseks keskkonnamüra allikaks ning tõsiseks keskkonnaprobleemiks, mis põhjustab pikaajalisel kokkupuutel mitmesuguseid terviseriske. Iga neljas eurooplane peab taluma liikluspõhise müra üle 55 dB ning ligi 8 miljonit eurooplast kannatab liikluspõhise müra tingitud unehäirete käes (EEA, 2014). Haljaskatuste substraadikiht kaitseb katust täiendava heliisolatsioonikihi ja neelab üle katuse peegeldunud helilaineid, mille tulemusel väheneb helilainete kandumine läbi katuse siseruumidesse (Van Renterghem & Botteldooren, 2011). Haljaskatused võivad madalate ja keskmiste helisageduste juures (50 – 2000 Hz) heli ülekandumise kadu suurendada 5 – 13 dB ning kõrgematel sagedustel 2 – 8 dB (Connelly & Hodgson, 2013). Van Renterghem ja Botteldooren (2008) uurisid haljaskatuste heliisolatsioonivõime sõltuvust helisagedusest ja substraadikihi paksusest ning leidsid, et madalatel sagedustel on summutusefekti saavutamiseks vajalik paksem substraadikiht. Sagedusel 1000 Hz oli ekstensiivse katuse puhul optimaalseks substraadikihi paksuseks 10 cm,

mis tagas tavapärase jäiga katusega võrreldes 10 dB helitugevuse vähenemise. Sagedusel 500 Hz oli optimaalne paksus 20 cm, tagades 6 dB helitugevuse vähenemise. Uuringust järeldus, et 15 – 20 cm paksune substraadikiht on piisav hea heliisolatsiooniefekti saavutamiseks üle laia sagedusvahemiku.

Peale eespool nimetatut võimaldab haljaskatuste rajamine linnakeskkonda taasluua linnaarenduse käigus kaotatud elupaiku mitmetele linnu-, looma- ja putukaliikidele ning taastada bioloogilist mitmekesisust. Kanadas uuriti haljaskatuste sobivust mesilaselaadsete putukate elupaigana, kellel on oluline roll kohaliku taimestiku tolmendamisel. Uuringu käigus tuvastati võrdlusaladelt ning katustelt kokku 79 erinevat liiki, kes kuulusid 24 perekonda. Kogutud isendite liigiline koosseis oli nii maapealsetel elupaikadel kui ka haljaskatustel sarnane, kuid vähemalt ühte kohalikku liiki (*Lasioglossum pilosum* Smith) leidis haljaskatustel oluliselt suuremal hulgal kui maapealsetel võrdlusaladel (Colla et al., 2009). Parkins ja Clark (2015) uurisid New Yorgi linna nahkhiirte elupaiku ning võrdlesid nahkhiirte aktiivsust haljastatud katustega ja tavapärase katustega hoonete kohal. Mõlema katusetüübi puhul tuvastati piirkonnas samad nahkhiireliigid (*Lasiurus borealis*; *Lasiurus cinereus*; *Lasionycteris noctivagans*; *Perimyotis subflavus*; *Eptesicus fuscus*), kuid haljaskatuste kohal oli nahkhiirte aktiivsus ning ülelendude arv suurem, mida võib seletada suurema lüljalgsete arvukuse ning paremate toitumistingimustega.

## **2. Protsesside kirjeldus ja maailmas läbiviidud uuringud**

### **2.1. Kasvuhoonegaaside vood linnakeskkonnas**

Inimtekkeliste kasvuhoonegaaside heitkogused on industriaalsest perioodist alates pidevalt suurenenud ning sellega on kaasnud süsihappegaasi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja diämmastikoksiidi (N<sub>2</sub>O) kontsentratsioonide märkimisväärne tõus atmosfääris. Nimetatud kasvuhoonegaaside atmosfäärsete kontsentratsioonide suurenemist peetakse alates 20. sajandi keskpaigast täheldatud soojenemise oluliseimaks põhjuseks (IPCC, 2014). Võrreldes 1750. aastaga on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ning N<sub>2</sub>O kontsentratsioonid atmosfääris suurenenud vastavalt 40%, 150% ja 20%. Summaarne inimtekkeliste kasvuhoonegaaside emissioon 2010. aastal oli 49 ± 4,5 Gt CO<sub>2</sub> ekvivalenti, millest suurima osa (76%) moodustas CO<sub>2</sub>. CH<sub>4</sub> osakaal globaalsest heitkogusest oli 16%, N<sub>2</sub>O osakaal 6,2% ning ülejäänud osa moodustasid fluoritud gaasid, mida

kokkuvõtlikult nimetatakse F-gaasideks. Suurim osa 2010. aasta globaalsest heitkogusest pärines energeetikasektorist (35%), millele järgnesid põllumajandus- ja metsandussektor koos muu maakasutusega (24%), tööstussektor (21%), transpordisektor (14%) ning ehitussektor (6,4%) (IPCC, 2014).

Enam kui 50% maailma rahvastikust elab linnapiirkondades ning seetõttu pärineb oluline osa antropogeensetest kasvuhoonegaaside emissioonist just linnadest (Kennedy et al., 2009). Linnade emissioon moodustab globaalsest inimtekkeliste kasvuhoonegaaside heitkogusest hinnanguliselt 30–40% (Satterthwaite, 2008). Oluline osa antropogeensest CO<sub>2</sub> emissioonist tekib linnapiirkondades fossiilsete kütuste põletamisel, kus põhilisteks kütuste tarbijateks ning ühtlasi ka emissioonide allikateks on transport, tööstustegevused ning elektri- ja soojusenergia tootmine. Peale kütuste põletamise toimub CO<sub>2</sub> emiteerimine atmosfääri ka läbi hingamisprotsesside, seda nii inimeste, taimede kui ka mulla poolt (Christen, 2014). Mullast pärinevad CO<sub>2</sub> emissioonid on peamiselt tingitud taimejuurte autotroofsest ja mikroorganismide heterotroofsest hingamisest, mida kokkuvõtvalt nimetatakse mullahingamiseks (Raich & Schlesinger, 1992). CO<sub>2</sub> emissiooni määr mullast sõltub eelkõige mikrobioloogilist aktiivsust mõjutavatest teguritest, sealhulgas mulla temperatuurist, niiskusest ning orgaanilise materjali kogusest ja kvaliteedist (Trumbore, 2006). Kaye jt (2005) hindasid, et linnakeskkonnas võivad mullahingamise vood olla 3 – 5 korda kõrgemad kui teiste ökosüsteemide puhul. Suurlinnades tekib märkimisväärselt CO<sub>2</sub> ka inimeste hingamise tulemusel. Moriwaki ja Kanda (2004) hindasid, et linnas, kus asustustihedus on 11800 inimest ruutkilomeetri kohta, moodustas inimeste poolt väljahingatav CO<sub>2</sub> kogus suvel 38% ning talvel 17% linna CO<sub>2</sub> emissioonist. Linnakeskkonnas käitub taimestik nii CO<sub>2</sub> sidujana kui ka CO<sub>2</sub> allikana. Taimed seovad päeval fotosünteesimise käigus atmosfäärist CO<sub>2</sub> ning öösel emiteerivad osa sellest läbi hingamisprotsessi tagasi (Velasco & Roth, 2010). Gratani jt (2016) leidsid Rooma linna parke uurides, et 9,7 ha pindalaga park on võimeline siduma hinnanguliselt 756 mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>.

Metaani emissioonid linnakeskkonnas tekivad maagaasi ning mitmesugustes kütustes, näiteks bensiinis leiduvate süsivesinike mittetäielikul põlemisel (Nakagawa et al., 2005). Metaani võib atmosfääri sattuda ka maagaasi torujuhtmete lekete korral, näiteks Ameerika Ühendriikides on torujuhtmete lekked põhiliseks inimtekkeliste CH<sub>4</sub> emissioonide allikaks (Phillips et al., 2013). Phillips jt (2013) mõõtsid Bostoni linnas maagaasitrassi lekkekohtades metaani kontsentratsiooniks kohati 28,6 ppm, mis ületas taustkontsentratsiooni 14-kordselt. Võimalikeks emissioonide allikaks võivad olla ka prügilad, kus toimub anaeroobsetes

tingimustes toidu- ning muude kergesti lagundatavate jäätmete lagundamine metanogeensete mikroorganismide poolt, mille tagajärjel eraldub atmosfääri  $\text{CH}_4$  (Bogner & Matthews, 2003). Muld võib käituda nii metaani emiteerijana kui ka sidujana. Metaani emiteerijateks on mulla anoksilistes piirkondades elavad metanogeensed mikroorganismid, kes lagundavad orgaanilist süsinikku. Metaani sidujateks on mulla hästi drenitud ning õhustatud osades elavad metanotroopsed bakterid, kes oksüdeerivad atmosfäärset metaani (Conrad, 1996). Metaani emiteerimine ning oksüdeerimine võivad mulla erinevatel sügavustel või piirkondades toimuda samaaegselt ning mulla käitumine, kas  $\text{CH}_4$  emiteerijana või sidujana sõltub sellest, kumb mehhanismidest on domineeriv (Dalal et al., 2008).

Dilämmastikoksiidi ( $\text{N}_2\text{O}$ ) emiteeritakse linnakeskkonda põhiliselt fossiilsete kütuste põletamise tagajärjel. Emissioonide allikateks on energeetikasektor, jäätmekäitlussektor ning maanteedtransport (Famulari et al., 2010). Edinburghis tehtud uuringus selgus, et  $\text{N}_2\text{O}$  kontsentratsiooni muutus linnaõhus oli tugevas seoses linna liiklustihedusega. Uuringust järeldus, et autoliiklus ning eriti katalüüsmuunduriga sõidukid on linnakeskkonnas põhiliseks  $\text{N}_2\text{O}$  emissioonide allikaks (Famulari et al., 2010). Osa linna  $\text{N}_2\text{O}$  voost pärineb ka aedade, parkide ning muude haljasalade mullast (Hall et al., 2008). Mullas tekib  $\text{N}_2\text{O}$  nitrifikatsiooni- ja denitrifikatsiooniprotsesside tulemusel, millest põhiliseks peetakse denitrifikatsiooni. Denitrifikatsiooni käigus redutseeritakse nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ) või nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) anaeroobsete mikroorganismide poolt lämmastikoksiidiks ( $\text{NO}$ ), dilämmastikoksiidiks ( $\text{N}_2\text{O}$ ) või molekulaarseks lämmastikuks ( $\text{N}_2$ ) (Firestone & Davidson, 1989). Hall jt (2008) leidsid erinevat tüüpi haljasalade  $\text{N}_2\text{O}$  voogude võrdlemisel, et linnakeskkonnas on põhilisteks emiteerijateks muruplatsid, kus on tänu väetiste kasutamisele, suurenenud orgaanilise aine sisaldusele ning pidevale vee kättesaadavusele mikrobioloogiline aktiivsus ning seeläbi ka denitrifikatsiooni intensiivsus kõrge. Kuna mullas elavad denitrifitseerivad bakterid on võimelised  $\text{N}_2\text{O}$  redutseerima molekulaarseks lämmastikuks ( $\text{N}_2$ ), võivad mullad ühtlasi käituda ka  $\text{N}_2\text{O}$  neeldajana. Mulla  $\text{N}_2\text{O}$  neeldajana käitumise potentsiaal sõltub aga mulla omadustest, sealhulgas mineraalse lämmastiku kättesaadavusest, temperatuurist ja pH-st (Syakila et al., 2010).

Kasvuhoonegaaside senises tempos jätkuv atmosfääri paiskamine toob kaasa kliima edasise soojenemise, mis suurendab nii inimestele kui ka paljudele ökosüsteemidele tõsiste ning pöördumatute tagajärgede tekkimise tõenäosust. Riskide maandamisel on oluline osa inimtekkeliste kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamisel ning leevendavate meetmete väljatöötamisel (IPCC, 2014). Rohelise infrastruktuuri rajamine võib aidata leevendada



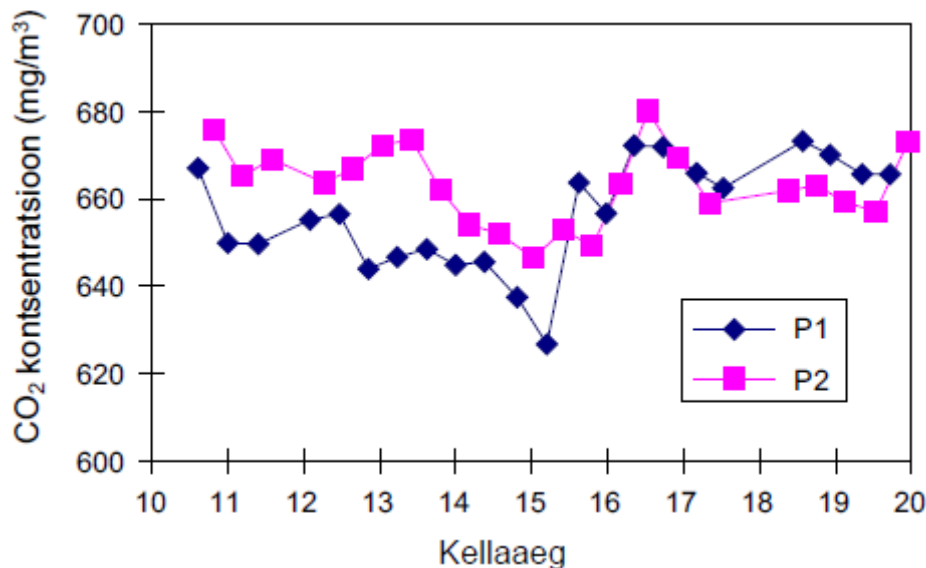
kliimamuutusega kaasnevaid mõjusid linnapiirkondades (Matthews et al., 2015). Katusehaljastusel võib olla roll kliimamuutustega kohanemiseks ning antropogeensete kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamiseks linnakeskkonnas.

## 2.2. Kasvuhoonegaaside mõõtmised haljaskatustelt

Maailmas on varasemalt ulatuslikult uuritud haljaskatuste vee kinnipidamise võimet, temperatuurirežiimi, mõju hoonete energiatarbele, soojussaare efekti vähendamise potentsiaali ning mitmeid teisi omadusi, kuid haljaskatuste kasvuhoonegaaside sidumise ning emissioonide kohta on uurimistööd tehtud väga vähesel määral. Kolmest käesolevas töös käsitletavast kasvuhoonegaasist ( $\text{CO}_2$ ;  $\text{CH}_4$ ;  $\text{N}_2\text{O}$ ) on maailmas haljaskatuste puhul varasemalt uuritud vaid  $\text{CO}_2$  voogusid. Alljärgnevalt on varasematest uuringutest välja toodud mõned tähtsamad.

Li jt (2010) uurisid Hong Kongis katusehaljastuse mõju linnaõhu  $\text{CO}_2$  kontsentratsioonile. Uurimisobjektiks oli kuuekordse hoone katus, mis oli osaliselt haljastatud. Katusel oli kokku neli taimkattega piirkonda, millest igaüks oli mõõtmisega  $4 \times 4$  meetrit.  $\text{CO}_2$  kontsentratsioonide mõõtmised viidi läbi kahes katuse punktis: esimene mõõtepunkt paiknes ühe haljastatud ala keskel, teine punkt oli betoonkattega võrdlusala ning asus esimesest 2 meetri kaugusel. Mõõtmisteks kasutati gaasianalüsaatorit (LI-7500), mille  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni mõõtetäpsuseks oli kuni  $1 \text{ mg/m}^3$ . Väheste pilvisusega ning nõrga tuulega päikesepaistelisel päeval (enne kella 16.00) oli keskmine  $\text{CO}_2$  kontsentratsioon taimestatud mõõdeala (P1) kohal  $12,9 \text{ mg/m}^3$  võrra madalam kui referentsalal (P2) (Joonis 2). Öhtusel ajal (peale kella 17.00) oli taimkattega ala (P1) kohal keskmine  $\text{CO}_2$  kontsentratsioon aga  $4,9 \text{ mg/m}^3$  võrra kõrgem kui võrdlusalal (P2). Ajavahemikul 07.30 – 16.00 paistis päikesevalgus otse katusele, mistõttu oli katuse taimestiku fotosünteesiline aktiivsus kõrge ning  $\text{CO}_2$  sidumise tulemusel kontsentratsioon taimestatud mõõdeala (P1) kohal langes. Peale kella 16.00 asusid ümbritsevad hooned katust ja taimestikku varjutama, mistõttu muutus fotosünteesiprotsessi asemel domineerivaks hingamine ning taimed asusid õhulõhede kaudu keskkonda  $\text{CO}_2$  emiteerima, põhjustades taimestatud ala (P1) kohal  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni tõusu. Peale välimõõtmiste viisid autorid taimede  $\text{CO}_2$  sidumise ning emiteerimise potentsiaali hindamiseks läbipaistvas fotosünteesikambris läbi eksperimendi piirkonnas laialdaselt levinud taimeliigiga (*Ixora chinensis*). Kambermõõtmise tulemused näitasid, et taimestiku  $\text{CO}_2$  sidumine ( $21 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) päikesepaistelisel päeval on üheksa korda intensiivsem kui väheste valguse tingimustes

emiteerimine ( $2,33 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ). Kogutud andmete põhjal tehtud arvutisimulatsiooni tulemused näitasid, et päikesepaistelisel ning vähese tuulega päeval võib haljaskatus potentsiaalselt ümbritseva piirkonna  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni vähendada kuni 2% (Li et al., 2010).

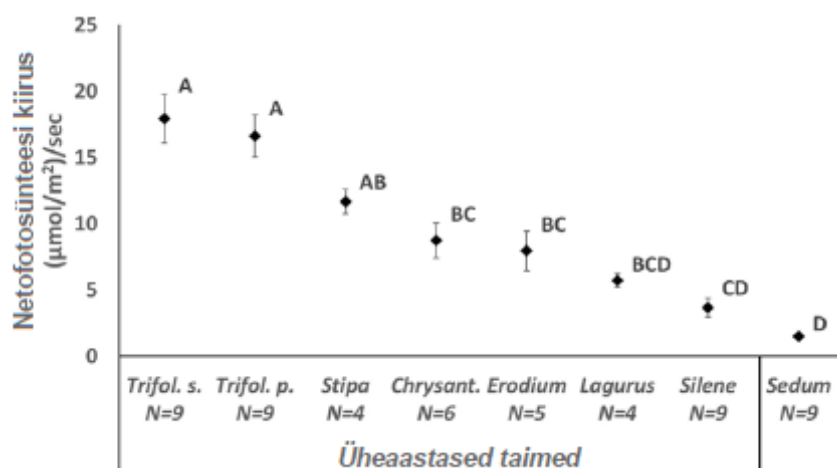


**Joonis 2.**  $\text{CO}_2$  kontsentratsioonid taimestatud mõõtealal (P1) ning referentsalal (P2) (Li et al., 2010).

Ismail jt (2012) mõõtsid Malaisias ühekorruselise eluhoone katusel rand-lehtertapi (*Ipomoea pes-caprae*) süsihappegaasi sidumise võimet. Uuringu käigus paigaldati hoone lamekatusel 102 potti istutatud taime. Mõõtmiste läbiviimiseks valiti katusele paigaldatud taimedest juhuslikult välja 10 taime ning iga taime puhul valiti omakorda välja 2 tervet ja täielikult välja arenenud lehte, mis olid otsese päikesevalguse käes. Lehtede fotosünteesilise aktiivsuse mõõtmiseks kasutati LI-6400 kaasaskantavat mõõteseadet ning mõõtmised viidi läbi kahe kuu jooksul. Juulikuus oli ühe mõõtepäeva keskmiseks netofotosünteesi kiiruseks  $7,503 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ning aprillikuu keskmine päevane netofotosünteesi kiirus oli  $4,6845 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Aprillikuu mõnevõrra väiksem väärtus oli tingitud mõõtealal valitsenud kõrgemast õhutemperatuurist. Kogutud mõõteandmete põhjal arvutati välja lehtede aasta keskmine netofotosünteesi kiirus, mis oli  $6,09 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Lehtede keskmiste sidumismäärade põhjal hinnati ühe taime poolt seotud aastaseks summaarseks  $\text{CO}_2$  koguseks  $48,19 \text{ kg}$  (Ismail et al., 2012).

Agra jt (2017) mõõtsid Iisraelis hoone katusele rajatud katsealal taimede süsihappegaasi sidumise võimet. Mõõtealad katusel jagunesid taimestiku järgi nelja klassi: taimedeta

kontrollala; kukeharjadega mõõteala; üheaastaste taimedega mõõteala; üheaastaste taimede ja kukeharjadega mõõteala. Uuringu käigus mõõdeti nelja päeva jooksul mõõtealadel enim levinud taimede (*Trifolium stellatum*; *Trifolium purpureum*; *Stipa capensis*; *Silene aegyptiaca*; *Chrysanthemum coronarium*; *Lagurus ovatus*; *Erodium malacoides*; *Sedum sediforme*) CO<sub>2</sub> omastamise kiiruseid ning CO<sub>2</sub> kontsentratsioone mõõtealade kohal (50 cm). Taimelehtede gaasivahetuse uurimiseks kasutati kaasaskantavat gaasianalüsaatorit LI-6400XT ning CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni mõõtmiseks mõõtealade kohal kasutati hajumisvabal infrapunaspektromeetrial (NDIR) põhinevat analüsaatorit. Kaheksast uuritud taimeliigist oli suurim netofotosünteesi kiirus ristikutel (*Trifolium stellatum*; *Trifolium purpureum*), mis oli võrreldes kukeharjaga (*Sedum sediforme*) ligi viis korda suurem (Joonis 3). Kolmest uuringus võrreldud haljastatud mõõtealast toimus suurim CO<sub>2</sub> sidumine üheaastaste taimedega mõõteala kohal. Mõnevõrra väiksem sidumine toimus vaid kukeharjadega haljastatud mõõtealade kohal ning kõige väiksem oli see kukeharjade ja üheaastaste taimede seguga haljastatud mõõtealade kohal. Autorid leidsid, et kukeharjad võivad üheaastaste taimedega segamini kasvades viimaste CO<sub>2</sub> sidumise võimet negatiivselt mõjutada. Uuringu kohaselt on maksimaalse CO<sub>2</sub> sidumisvõime saavutamiseks sobivaimad taimeliigid eelkõige üheaastased taimed, näiteks ristikud (*Trifolium*), kuid võrreldes kukeharjadega on nende eluiga lühike ning esteetiline väärtus seetõttu väiksem. Kukeharjade CO<sub>2</sub> sidumise võime on seevastu oluliselt väiksem kui üheaastastel taimedel ning seetõttu tuleks kukeharjakatuse süsihappegaasi sidumise potentsiaali tõstmiseks katusele lisada ka üheaastaseid taimi, kuid taimede omavaheliste mõjutuste vältimiseks peaksid üheaastased taimed kasvama eraldatult (Agra et al., 2017).



**Joonis 3.** Erinevate taimeliikide CO<sub>2</sub> sidumise kiirused (Agra et al., 2017).

### 3. Materjal ja metoodika

#### 3.1. Mõõtmisalade kirjeldus

Käesoleva magistritöö mõõtmisalade valimisse kuulus neliteist erinevat haljaskatust üle Eesti ning üks looduslikul paepealsel mullal asuv võrdlusala. Haljaskatused jaotati kasvukihi omaduste ning taimkatte alusel kolme klassi:

1. Matipõhised haljaskatused (3 katust) – taimkatteks valdavalt põuakindlatest taimeliikidest koosnev ettekasvatatud taimematt, substraadikihiks õhuke kergkivikeste ja mulla segu paksusega 30 – 60 mm, vanuselt vahemikus 4 – 10 aastat;
2. Kergkruusapõhised haljaskatused (4 katust) – taimed üldiselt istutatud või külvatud seemnest, substraadikihiks kergkruusakiht paksusega 100 – 200 mm, vanuselt vahemikus 9 – 14 aastat;
3. Mullapõhised haljaskatused (7 katust) – taimestik üldiselt külvatud seemnest või asetatud katusele mättana, substraadikihiks muld paksusega 100 – 250 mm, vanuselt vahemikus 3 – 13 aastat.

##### 3.1.1. Matipõhised haljaskatused

Rakvere Eragümnaasiumi algkoolihoone haljaskatus asub Lääne-Viru maakonnas Rakvere linnas, aadressil Tööstuse tn 12a (59° 21' 14" N, 26° 21' 25" E). Hoone rõngakujuline ja mitmetasandiline haljaskatus rajati 2006. aastal ning katuse pindalaks on hinnanguliselt 650 m<sup>2</sup> (Lisa 1, Joonis 24). Katuse kaldenurk on väike, hinnanguliselt 10°. Katus on haljastatud kukeharjade segul põhineva taimematiga (*Sedum acre*, *Sedum album*, *Sedum spurium*, *Sedum pulchellum*), mille all paikneb mulla ja kergkruusa segust koosnev kasvukiht. Substraadikihi paksuseks uurimisalal mõõdeti 60 mm. Taimedest esines peale kukeharjade katusel veel nõmm-liivateed (*Thymus serpyllum*), humallutserni (*Medicago lupulina*), liiv-koeratubakat (*Crepis tectorum*), harilikku käokannust (*Linaria vulgaris*), väikest nõmmemünti (*Acinos thymoides*), hõbemaraniit (*Potentilla argentea*), norra maraniit (*Potentilla norvegica*), harilikku tihasheina (*Scutellaria galericulata*) ning kassisaba (*Veronica spicata*).

Palamuse vallamaja haljaskatus asub Jõgeva maakonnas Palamuse vallas Palamuse alevikus, aadressil Kooli tn 4 (58° 40' 59" N, 26° 34' 26" E). Haljaskatus on mitmetasandiline ning katuse pindala on hinnanguliselt 950 m<sup>2</sup> (Lisa 1, Joonis 25). Kolmveerandringi kujuline haljaskatus

rajati 2010. aastal ning suuremas osas on katus hinnanguliselt kuni 10° kaldega. Katus kaeti kukeharjade segul põhineva taimematiga (*Sedum acre*, *Sedum album*, *Sedum spurium*, *Sedum pulchellum*, *Sedum rubrotinctum*, *Sedum kamtschaticum*), kuhu on nüüdseks lisandunud ulatuslikult sammalt (*Ditrichum flexicaule* jt), mis on asunud kukeharja välja tõrjuma. Kukeharjad paiknevad katusel laiguti väiksemate puhmastena. Taimematt koosneb kärjekujulise struktuuriga plastikvõrgust ning võrgu all paiknevast geotekstiilist. Taimemati all asub õhuke kiht purustatud kergkruusa. Substraadikihi paksuseks uurimisalal mõõdeti 30 mm. Peale sambla ja kukeharjade olid katusel esindatud veel nõmm-liivatee (*Thymus serpyllum*), valge ristik (*Trifolium repens*), humallutsern (*Medicago lupulina*) ja liiv-koeratubakas (*Crepis tectorum*).

Iisaku Looduskeskuse haljaskatus asub Ida-Viru maakonnas Iisaku vallas Iisaku alevikus, aadressil Aia tn 10 (59° 05' 42" N, 27° 18' 59" E). Katus ehitati 2012. aastal ning selle pindala on hinnanguliselt 165 m<sup>2</sup> (Lisa 1, Joonis 26). Katus koosneb lamedamast 8° kaldega osast ning järsemast 45° kaldega osast. Põhjasuunaline järsema kaldega katuseosa on haljastatud plastmoodulis kasvavate kukeharjadega, lamedam osa on kaetud 30 mm paksuse kukeharjade segul (*Sedum album*, *Sedum acre*, *Sedum spurium*, *Sedum pulchellum*, *Sedum kamtschaticum*) põhineva taimematiga. Mati all paikneb geotekstiil ning 50 mm paksune kergkivikeste ja mulla segu kiht. Taimedest olid lamedamal katuseosal mõõteperioodi jooksul peale kukeharjade esindatud veel müür-kipslill (*Gypsophila muralis*), harilik härjasilm (*Leucanthemum vulgare*), harilik raudrohi (*Achillea millefolium*), valge mesikas (*Melilotus albus*), nõmm-liivatee (*Thymus serpyllum*), põld-lõosilm (*Myosotis arvensis*) ja sõlmine kesakann (*Sagina nodosa*).

### **3.1.2. Kergkruusapõhised haljaskatused**

Viimsi Lasteaia Pargi maja haljaskatus asub Harju maakonnas Viimsi vallas Viimsi alevikus, aadressil Pargi tee 3 (59° 30' 09" N, 24° 50' 17" E). Pargi maja katusehaljastus rajati 2002. aastal ning see koosneb neljast omavahel eraldatud osast, milleks on hoone fuajee kergkruusapõhine haljaskatus (170 m<sup>2</sup>) ning kolm väiksemat haljastatud varikatust. Katuse haljastatud osade kogupindalaks on 270 m<sup>2</sup>. Kolm väiksemat varikatust olid 10° kaldega, suurima katuseosa puhul oli kalle väiksem. Hoone fuajee haljaskatusel, kus mõõtmised läbi viidi, mõõdeti substraadikihi paksuseks 200 mm (Lisa 1, Joonis 27). Taimeliikidest olid katusel esindatud harilik kukehari (*Sedum acre*), nõmm-liivatee (*Thymus serpyllum*), harilik kortsleht (*Alchemilla vulgaris*), karvane kadakkaer (*Cerastium tomentosum*), valge kukehari (*Sedum album*) ja kink-kukehari (*Sedum reflexum*).

SA Archimedese haljaskatus asub Tartu maakonnas Tartu linnas, aadressil Väike-Turu tn 8 (58° 22' 39" N, 26° 44' 09" E). Tegemist on lameda kergkruusapõhise substraadiga haljaskatusega, mis asub kolmekordse hoone esimesel korrusel asuvate kontoriruumide peal ning on ühtlasi kasutusel ka katuseterrassina (Lisa 1, Joonis 28). Haljaskatus rajati 2003. aastal ning selle pindalaks on 60,3 m<sup>2</sup>. Haljaskatus on ääristatud terrassilaudadega ning kolmest küljest käsipuudega. Substraadikiht koosneb kolme erineva fraktsiooniga kergkruusast (0 – 2 mm, 2 – 4 mm, 4 – 20 mm) ning selle paksuseks on 100 mm. Mõõteperioodil oli taimedega katvus hinnanguliselt 40%. Taimeliikidest olid katusel esindatud nõmm-liivatee (*Thymus serpyllum*), harilik kukehari (*Sedum acre*), aed-lõosilm (*Myosotis sylvatica*), nurmelk (*Dianthus deltoides*), kartuusia nelk (*Dianthus carthusianorum*) ja arendsi kivirik (*Saxifraga arendsii*).

Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi (TÜTI) haljaskatus asub Tartu maakonnas Tartu linnas, aadressil Nooruse tn 1 (58° 21' 58" N, 26° 41' 40" E). Haljaskatus paikneb hoone esimesel korrusel asuva kohviku DuNord kohal ning on hooajaliselt kasutusel katuseterrassina (Lisa 1, Joonis 29). Haljaskatus rajati 2005. aastal ning selle pindalaks on 370 m<sup>2</sup>. Mulla ning kergkruusa segul põhineva kasvukihi paksuseks mõõdeti 120 mm. Põhjasuunaline haljaskatus on suurema osa päevast 7-korruselise instituudihoone poolt varjutatud, vähesel määral paistab taimedele õhtupäike. Taimkate katusel on tihe ning koosneb põhiliselt rohttaimedest. Levinud liikideks olid harilik raudrohi (*Achillea millefolium*), aasristik (*Trifolium pratense*), harilik kerahein (*Dactylis glomerata*), punane aruhein (*Festuca rubra*), harilik põisrohi (*Silene vulgaris*), aas-seahernes (*Lathyrus pratensis*), mets-pajulill (*Epilobium adenocaulom*), harilik kuldkann (*Helianthemum nummularium*) ja niiduehmik (*Thuidium philibertii*).

Eesti Maaülikooli peahoone lame haljaskatus asub Tartu maakonnas Tartu linnas, aadressil Kreutzwaldi tn 1a (58° 23' 18" N, 26° 41' 48" E). Haljaskatus rajati 2007. aastal ning katuse kogupindalaks on 1600 m<sup>2</sup> (Lisa 1, Joonis 30). Kergkruusapõhise substraadikihi paksuseks mõõdeti 110 mm. Taimede katvus katusel oli mõõteperioodil võrdlemisi väike (25%) ning fragmenteerunud, piirkonniti esines katusel sammalt. Taimedest leidis katusel enim valget kukeharja (*Sedum album*), harilikku kukeharja (*Sedum acre*), kuuetist kukeharja (*Sedum sexangulare*) ja nõmm-liivateed (*Thymus serpyllum*), kuid ka roomavat kukeharja (*Sedum spurium*), põld-hiirehernest (*Vicia villosa*), valget ristikut (*Trifolium repens*) ja mägiarnikat (*Arnica montana*).

### 3.1.3. Mullapõhised haljaskatused

Loomaaed-03 tähistusega haljaskatus asub Harju maakonnas Tallinna linnas Haabersti linnaosas, aadressil Ehitajate tee 150 (59° 24' 56" N, 24° 39' 40" E). Tegemist on ühega 18 Tallinna Loomaaia alpinaariumi mätaskatusega hoonest, mis on kasutusel ühest küljest mägikitsede tallina ning teisest talitajate tööruumina. Mullapõhise substraadiga haljaskatus rajati 2003. aastal. Katuse pindalaks on 120 m<sup>2</sup> ning kaldeks 20° (Lisa 1, Joonis 31). Substraadikiht koosneb rähksest mullast, mille paksuseks mõõdeti 150 mm. Haljaskatus on kaetud pea täielikult kõrrelistega, peamisteks taimeliikideks on lamba-aruhein (*Festuca ovina*) ja punane aruhein (*Festuca rubra*). Peale nimetatud liikide esines katusel ka harilikku raudrohtu (*Achillea millefolium*), harilikku puju (*Artemisia vulgaris*), liiv-koeratubakat (*Crepis tectorum*), harilikku lutserni (*Medicago sativa*), keskmist teelehte (*Plantago media*), põldkannikest (*Viola arvensis*) ja halli kogelearohtu (*Berteroa incana*).

Loomaaed-08 tähistusega haljaskatus asub Harju maakonnas Tallinna linnas Haabersti linnaosas, aadressil Ehitajate tee 150 (59° 25' 00" N, 24° 39' 36" E). Tegemist on samuti ühega Tallinna Loomaaia alpinaariumi mätaskatusega hoonetest, mis on kasutusel loomade tallina (Lisa 1, Joonis 32). Hoone mätaskatus rajati 2008. aastal. Katuse pindalaks on samuti 120 m<sup>2</sup> ning kaldeks 20°. Substraadikiht koosneb rähksest mullast, mille paksuseks mõõdeti 150 mm. Katuse põhjasuunalisel küljel on levinud taimeliikideks harilik raudrohi (*Achillea millefolium*), lamba-aruhein (*Festuca ovina*), harilik puju (*Artemisia vulgaris*), punane aruhein (*Festuca rubra*), hall kogelearoht (*Berteroa incana*), jaani-õnnehein (*Erigeron acer*), valge mesikas (*Melilotus albus*), keskmine teeleht (*Plantago media*) ja neljaseemnene hiirehernes (*Vicia tetrasperma*). Lõunasuunalisel küljel on peamisteks taimedeks harilik kukehari (*Sedum acre*) ja valge kukehari (*Sedum album*).

Mägede garaaži tähistusega haljaskatus asub Järva maakonnas Albu vallas Mägede külas (59° 13' 47" N, 25° 35' 13" E). Haljaskatus rajati 2009. aastal, selle pindalaks on 161 m<sup>2</sup> ning kaldeks 23° (Lisa 1, Joonis 33). Haljaskatusega hoone on kasutusel garaaži ja tööriistakuurina. Katuse substraadikihi paksuseks on 250 mm ning see koosneb piirkonnale iseloomulikust mullast. Piirkonna mullatüüpideks on nõrgalt leetunud muld (L<sub>kl</sub>) ning nõrgalt leetunud leedemuld (L<sub>l</sub>). Lõimiseks on valdavalt saviliivad ja liivad. Katuse idapoolses osas oli domineerivaks taimeliigiks kõrvenõges (*Urtica dioica*), läänepoolses osas, kus ka mõõtmised toimusid, olid levinud taimeliikideks harilik orashein (*Elymus repens*), harilik puju (*Artemisia vulgaris*), põld-litterhein (*Thlaspi arvense*), hall kogelearoht (*Berteroa incana*), põld-kadakkaer (*Cerastium*

*arvense*), kartuusia nelk (*Dianthus carthusianorum*), jaani-õnnehein (*Erigeron acer*), lamba-aruhein (*Festuca ovina*), punane aruhein (*Festuca rubra*), valge mesikas (*Melilotus albus*), hõbemaran (*Potentilla argentea*), väike oblikas (*Rumex acetosella*) ja valge pusurohi (*Silene alba*).

Mägede keldri tähistusega haljaskatus asub Järva maakonnas Albu vallas Mägede külas (59° 13' 47" N, 25° 35' 13" E). Haljaskatus rajati 2011. aastal, selle pindalaks on 70 m<sup>2</sup> ning kaldeks 23° (Lisa 1, Joonis 34). Haljaskatusega hoone täidab maapealse keldri funktsiooni. Katuse substraadikihi paksuseks on 200 mm ning see koosneb piirkonnale iseloomulikust mullast. Piirkonna mullatüüpideks on nõrgalt leetunud muld (L<sub>kl</sub>) ning nõrgalt leetunud leedemuld (L<sub>l</sub>). Lõimiseks on valdavalt saviliivad ja liivad. Levinud taimedeks katusel olid harilik raudrohi (*Achillea millefolium*), lamba-aruhein (*Festuca ovina*), punane aruhein (*Festuca rubra*), sirplutsern (*Medicago falcata*), valge mesikas (*Melilotus albus*), harilik kukehari (*Sedum acre*) ja nõmm-liivatee (*Thymus serpyllum*).

Haanja haljaskatus asub Võru maakonnas Haanja vallas Horoski külas (57° 43' 20" N, 27° 07' 24" E). Haljaskatus rajati 2005. aastal, selle pindalaks on 55 m<sup>2</sup> ning kaldeks 20° (Lisa 1, Joonis 35). Haljaskatusega hoone on kasutusel külalistehoonena. Hoone on pea täielikult ümbritsevate kõrgete puude poolt varjutatud, mistõttu on katusel kasvavad taimed suurema osa päevast varjus. Haljaskatuse kasvukiht koosneb kohalikust mullast (120 mm) ning selle all asetsevast drenivast kergkruusast. Kohalikeks muldadeks on nõrgalt erodeeritud leetjas muld (K<sub>le</sub>) ja gleistunud deluviaalmuld (D<sub>g</sub>). Põhilisteks taimeliikideks katusel on metsmaasikas (*Fragaria vesca*) ja harilik vaarikas (*Rubus idaeus*).

Uusküla haljaskatus asub Ida-Viru maakonnas Alajõe vallas Uusküla külas (59° 00' 15" N, 27° 19' 25" E). Haljaskatus rajati 2013. aastal, selle pindalaks on 344 m<sup>2</sup> ning kaldeks 30° (Lisa 1, Joonis 36). Ühekorruseline haljaskatusega hoone on kasutusel eluhoonena. Haljaskatuse substraadikiht koosneb kohalikust mullast. Piirkonna mullaks on nõrgalt leetunud muld (L<sub>kl</sub>) ning lõimiseks valdavalt liiv. Substraadikihi paksuseks katusel mõõdeti 100 mm, mille all paikneb võrgule kinnitatud geotekstiil. Suurel hulgal esines katusel samblaid ning samblikke. Põhilisteks liikideks olid mets-põdrasamblik (*Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot.), alpi põdrasamblik (*Cladonia stellaris* (Opiz) Brodo), lainjas kaksikhammas (*Dicranum polysetum*), harilik pohl (*Vaccinium vitis-idaea*) ja harilik leesikas (*Arctostaphylos uva-ursi*), vähem leidsu lamba-aruheina (*Festuca ovina*), punast aruheina (*Festuca rubra*) ja harilikku ristirohtu (*Senecio vulgaris*).



**Tabel 1.** Lühiselgitused joonistel kasutatud mõõtealade lühendite kohta.

Tähis 1	Tähis 2	Selgitus
R	M_Rakvere	Rakvere Eragümnaasiumi algkoolihoone mattkatus
P	M_Palamuse	Palamuse vallamaja mattkatus
I	M_Iisaku	Iisaku Looduskeskuse mattkatus
V	K_Viimsi	Viimsi Lasteaia Pargi tn hoone kergkruusapõhine haljaskatus
A	K_Arch	SA Archimedese kergkruusapõhine haljaskatus
T	K_TÜTI	TÜ tehnoloogiainstituudi kergkruusapõhine haljaskatus (varjus)
M	K_EMÜ	Eesti Maaülikooli peahoone kergkruusapõhine haljaskatus
L3	R_Loom03	Tallinna Loomaaia 2003. a. rajatud mullapõhine rohukatus
L8	R_Loom08	Tallinna Loomaaia 2008. a. rajatud mullapõhine rohukatus
MG	R_Mäg gar	Mägede külas asuva kuur-garaažihoone mullapõhine rohukatus
MK	R_Mäg kel	Mägede külas asuva keldrihoone mullapõhine rohukatus
H	R_Haanja	Haanja vallas asuva külalistehoone rohukatus (varjus)
U	R_Uusküla	Uuskülas asuva eluhoone mullapõhine rohukatus
UK	TR_Ujula	Tartu Ujula Konsumi mullapõhine terrass-rohukatus
N	LK_Naage	Looduslik kontrollala Naage loopealne

Ujula Konsumi lame haljaskatus asub Tartu maakonnas Tartu linnas, aadressil Ujula tn 2a (58° 23' 11" N, 26° 43' 25" E). Haljaskatus on rajatud 2007. aastal ning selle pindalaks on 766 m<sup>2</sup>. Haljaskatus paikneb hoone esimesel korrusel asuva kaubanduskeskuse kohal ning on kasutusel teisel ja kolmandal korrusel asuvate korterite siseõuena, kuhu on rajatud sillutatud jalgteed ning pingid (Lisa 1, Joonis 37). Haljaskatuse substraadikihi paksuseks on 100 mm ning selle alumine pool koosneb saviliivast ning pealmine pool mullast. Mõnes piirkonnas on haljaskatus korterelamute poolt varjutatud. Põhilise osa taimkattest moodustasid lamba-aruhein (*Festuca ovina*), aasnurmikas (*Poa pratensis*) ning mõned teised rohttaimed. Vähemlevinud liikideks olid kurekael (*Erodium cicutarium*), karvane võõrkakar (*Galinsoga ciliata*), sügisene seanupp (*Leontodon autumnalis*), harilik kesalill (*Matricaria perforata*), humallutsern (*Medicago lupulina*) ja põld-lõosilm (*Myosotis arvensis*).

### 3.1.4. Naage võrdlusala

Naage võrdlusala asub Harju maakonnas Harku vallas Naage külas (59° 24' 14" N, 24° 22' 24" E). Võrdlusala asub õhukesel paepeasel mullal ( $K_h$ ), mille paksuseks uurimisalal mõõdeti 100 – 150 mm (Lisa 1, Joonis 38). Mullalõimiseks mõõtealal on keskmiselt koreseline keskmine liivsavi. Taimedest olid mõõtealal levinud metsülane (*Anemone sylvestris*), põld-kadakkaer (*Cerastium arvense*), suur aruhein (*Festuca gigantea*), hobumadar (*Galium verum*), harilik tõrvalill (*Lychnis viscaria* L.), mitmeõieline tulikas (*Ranunculus polyanthemus*), harilik kukehari (*Sedum acre*), lood-ristirohi (*Senecio integrifolius*), külmamailane (*Veronica chamaedrys*) ja kassisaba (*Veronica spicata*). Mõõteala ümber kasvasid harilikud kadakad (*Juniperus communis* L.).

## 3.2. Välitööde metoodika

### 3.2.1. Kasvuhoonegaaside ja CO<sub>2</sub> mõõtmine

Mõõtmised toimusid igal katusel kokku viis korda, maist septembrini 2016. aastal. Igale katusele paigaldati kolm plastikust rõngast (Ø 50 cm) keskmiselt 20 minutit enne gaasimõõtmisi. Esimesel mõõtekuul tehtud rõngavaod säilisid kogu uuringu perioodi, seega igakordne rõngaste paigaldamine samadesse kohtadesse ei põhjustanud täiendavaid häiringuid. Rõngad paigaldati põhimõttel, et oleksid esindatud katusel enam levinud taimeliigid. Rõngaste iseloomustus on toodud Lisas 2. Kasvuhoonegaaside voogusid mõõdeti staatilise suletud kambri meetodil valgete PVC kambritega (kõrgus 50 cm, maht 65 l). Kambrite ja rõngaste ühenduskoha tihendamiseks kasutati lamekatustel vett, kaldega katustel kummitihendeid. Kasutades polüpropüleenist süstalt ja plastvoolikuid, koguti 5 proovi (0, 15, 30, 45 ja 60 minutit) eelvakumeeritud (0,3 mbar) 100 ml klaaspudelitesse. Gaasiproovid analüüsiti Tartu Ülikooli geograafia osakonna laboris Shimadzu GC-2014 gaaskromatograafia (Loftfield et al., 1997).

Dünaamilise suletud kambri meetodil pleksiklaasist kambriga (kõrgus 50 cm, maht 65 l), varustatuna TRP-2 sondiga (PP Systems, Hitchin, UK) mõõtmaks PARi ja temperatuuri, mõõdeti kahe minuti jooksul ökosüsteemi hingamist (ER – *ecosystem respiration*) ja taimede sidumist koos mullahingamisega (NEE – *net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange*). Välistamiseks kambri kuumenemist, olid kambrisse installeeritud külmakehad ja õhku aeti kambris ringi kasutades ventilaatorit. CO<sub>2</sub> kontsentratsioon, PAR, kambri temperatuur, õhurõhk ja niiskus mõõdeti ja

salvestati kasutades gaasianalüsaatorit EGM-4 (PP Systems, Hitchin, UK), mis oli ühendatud kambriga sisse- ja väljavoolu voolikuga ( $\varnothing$  0,3 cm, voolukiirus 350 ml/min). Tulemuste alusel arvutati välja GPP (*gross primary production*,  $GPP = NEE - ER$ ), millest lähtuvalt leiti iga katuse keskmine NPP (*net primary production*,  $NPP = GPP / 2$ ). Lisaks leiti iga katuse iga kasvuhoonegaasi kohta GWP (*global warming potential*), teisendades eelnevalt CO<sub>2</sub>-C, CH<sub>4</sub>-C ja N<sub>2</sub>O-N vastavalt CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O-ks. GWP arvutamisel juhinduti IPCC 2014 ülevaates toodud koefitsientidest, mille alusel on CO<sub>2</sub> puhul koefitsient 1, CH<sub>4</sub> puhul 28 ja N<sub>2</sub>O puhul 265 (IPCC, 2014). Sellele järgnevalt liideti saadud GWP-d kogu-GWP-ks.

Gaasivoo intensiivsus arvutati gaasikontsentratsiooni lineaarse muutuse alusel (Hutchinson & Livingston, 1993; Mander et al., 2003). Vastav arvutusvalem koos täiendavate selgitustega on kirjeldatud Järveoja jt (2016) publikatsioonis (valem 6) (Järveoja et al., 2016). Staatilise kambri lineaarne tõus arvutati viie väärtuse kohta, dünaamilise kambri tõus 25 mõõdetud väärtuse kohta. Determinatsioonikordaja  $R^2$  lävendiks oli staatilise kambri puhul CO<sub>2</sub> kohta 0,90 ( $P < 0,05$ ) ning CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O kohta 0,80 ( $P < 0,1$ ). Juhul kui kontsentratsiooni muutus oli alla gaaskromatograafi määramisvea ( $< 20$  ppm CO<sub>2</sub>,  $< 20$  ppb CH<sub>4</sub> ja  $< 20$  ppb N<sub>2</sub>O puhul), antud kriteeriumit ei kasutatud. Kümne tõusu puhul eemaldati üks mõõtmispunkt regressioonigraafikult, millega paranes tulemuste determinatsioonikordaja ( $R^2$ ). Vastavalt toodud lävendile eemaldati kolm CO<sub>2</sub> ja kolm CH<sub>4</sub> tulemust edasisest analüüsist. Dünaamilise kambri CO<sub>2</sub> vood, mis vastasid tingimusele  $R^2 \geq 0,90$  ( $P < 0,001$ ), arvestati korrektseteks tulemusteks.

### 3.2.2. Täiendavad mõõtmised ja analüüsid

Iga mõõtmiskorra juurde kuulus mulla temperatuuri mõõtmine vastava logeriga (Comet Systems Ltd., Rožnov pod Radhoštěm, Tšehhi) kahel sügavusel (umbes 50 mm sügavusel ja substraadi põhjas, vastavalt katuse tüübile) ühes mõõtmispunktis. Tulemuste analüüsis kasutati 50 mm sügavusel mõõdetud temperatuuri, sest katuste erinevate paksuste tõttu ei olnud korrektne kasutada substraadi põhjas mõõdetud temperatuuri tulemust. Mullaniiskust ja elektrijuhtivust mõõdeti vastava sensoriga (mudel GS3, Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA) 50 mm sügavusel iga rõnga juures. Meteoroloogilised parameetrid uurimise all olnud haljaskatustele kõige lähemal olnud ilmajaamade lõikes pärinevad Eesti Keskkonnaagentuurist. Loomaaia, Naage ja Viimsi katuste kohta kasutati Tallinn-Harku, Archimedese, Ujula, TÜTI ja

EMÜ katuste kohta Tartu-Tõravere, Mägede ja Rakvere katuste kohta Väike-Maarja, Iisaku ja Uusküla katuste kohta Jõhvi, Palamuse katuse kohta Jõgeva ning Haanja katuse kohta Võru ilmajaama andmeid. Saadud andmete kasutamine tulemuste võrdlemisel ei pruugi mõnel juhul olla täiesti korrektne, näiteks ilmajaamadest kaugel asuvate Mägede katuste kohta käiva info tõepärasus. Vaatluse all olid järgmised parameetrid, mille kohta võeti vastavate perioodide keskmised (sademete puhul summad): õhutemperatuur (kaks nädalat, üks nädal, 24 tundi enne mõõtmist, mõõtmishetkel), sademete summa (kaks nädalat, üks nädal, 24 tundi enne mõõtmist), suhteline õhuniiskus (kaks nädalat, üks nädal, 24 tundi enne mõõtmist), päikesepaiste kestus (üks nädal enne mõõtmist). Lisaks küsiti Tallinn-Harku, Tartu-Tõravere ja Tiirikoja jaamade summaarse kiirguse ööpäevased summad, mida kasutati vastavalt Tallinna piirkonna ja Mägede, Tartu piirkonna ja Võru ning Palamuse, Rakvere, Iisaku ja Uusküla haljaskatuste kohta. Täiendavalt arvutati potentsiaalne evapotranspiratsioon vastavalt Turc'i valemile (Lu et al., 2005). Kiirguse ja evapotranspiratsiooni jaoks kasutati analüüsis ühe nädala keskmiseid ning mõõtmispäeva näituseid.

Augusti mõõtekuul koguti igalt katuselt komposiitproov (viiest kohast üle katuse) mullakeemia analüüsi tarbeks, mis analüüsiti Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituudi taimebiokeemia laboris. Määrati järgmised näitajad: üld-N, üld-C, üld-S (kuivpõletusmeetodil elementanalüsaatoril varioMAX-CNS), pH (KCl 1N lahusest), org. aine (tuhastustemperatuuril 360°C), NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N (2M KCl lahusest FIA (*Flow Injection Analysis*) analüüsil), P, K (ammooniumlaktaatlahusest FIA analüüsil), Ca, Mg (ammooniumatsetaadi 1M lahusest FIA analüüsil). Tulemused on antud kahe tüvenumbri täpsusega (Lisa 3).

Lisaks võeti augustikuus silindritesse igalt katuselt kolmes korduses mullaproovid N<sub>2</sub> sisalduse määramiseks HeO meetodil. Proov võeti sügavuselt 20 – 80 mm otse terassilindrisse (kõrgus 6 cm, Ø 7 cm), mille otsad suleti plastkaantega. Proovikehad hoiustati jahekapis +4 °C juures. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O ja N<sub>2</sub> voogude mõõtmiseks paigutati terassilindrid ühest otsast avatuna õhukindlatesse silindritesse, millest lasti läbi kunstlik gaasisegu (0,3 ppb N<sub>2</sub>O, 1,8 ppm CH<sub>4</sub>, 6 ppm N<sub>2</sub>, 350 ppm CO<sub>2</sub> ja ülejäänud He). Proovide läbipesu kestis 36 tundi, kergkruusa puhul 96 tundi, tagamaks kogu mullapoorides oleva algse õhu vahetumise uue kunstliku gaasiseguga. Voolutamise ajal mõõdeti gaaskromatograafia silindrite väljavoolus gaasikontsentratsiooni. Läbipesemise silindrid asuvad kliimakapis, kus saab muuta temperatuuri vahemikus –5 kuni 60 °C. Proovide läbipesu toimus temperatuuril 18 °C. CO<sub>2</sub> ja N<sub>2</sub> mõõtmiseks suleti silindrid kaheks tunniks ning mõõdeti kontsentratsiooni muutus (0, 40, 80 ja 120 minutit). N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub> mõõtmiseks võeti täiendavad gaasiproovid kahe tunni jooksul (0, 40, 80 ja 120 minutit)

eelvakumeeritud 50 ml klaaspudelitesse. Proovid analüüsiti sama gaaskromatograafia, millega analüüsiti kambrimeetodiga kogutud proovid. Gaasivoog arvutati kontsentratsiooni lineaarse ( $R^2 > 0,81$  ( $n = 4$ );  $p < 0,1$ ) muutuse alusel.

### **3.2.3. Statistiline andmeanalüüs**

Andmetest ülevaate saamiseks ning graafikute esitamiseks kasutati Microsoft Excel 2014 programmi. Lisaks tehti MS Excelis gaaside ja erinevate parameetrite omavaheliste seoste lihtanalüüs. Arvestades, et iga katuse kohta saadi kokkuvõtvalt vaid viis tulemust (gaaside keskmised tulemused ja mõõdetud/ilmajaamade parameetrid), ei olnud võimalik teha laiapõhjalist statistilist analüüsi. Seoste uurimiseks kasutati Spearmani korrelatsioonianalüüsi programmis Statistica 7 (Statsoft Inc.).

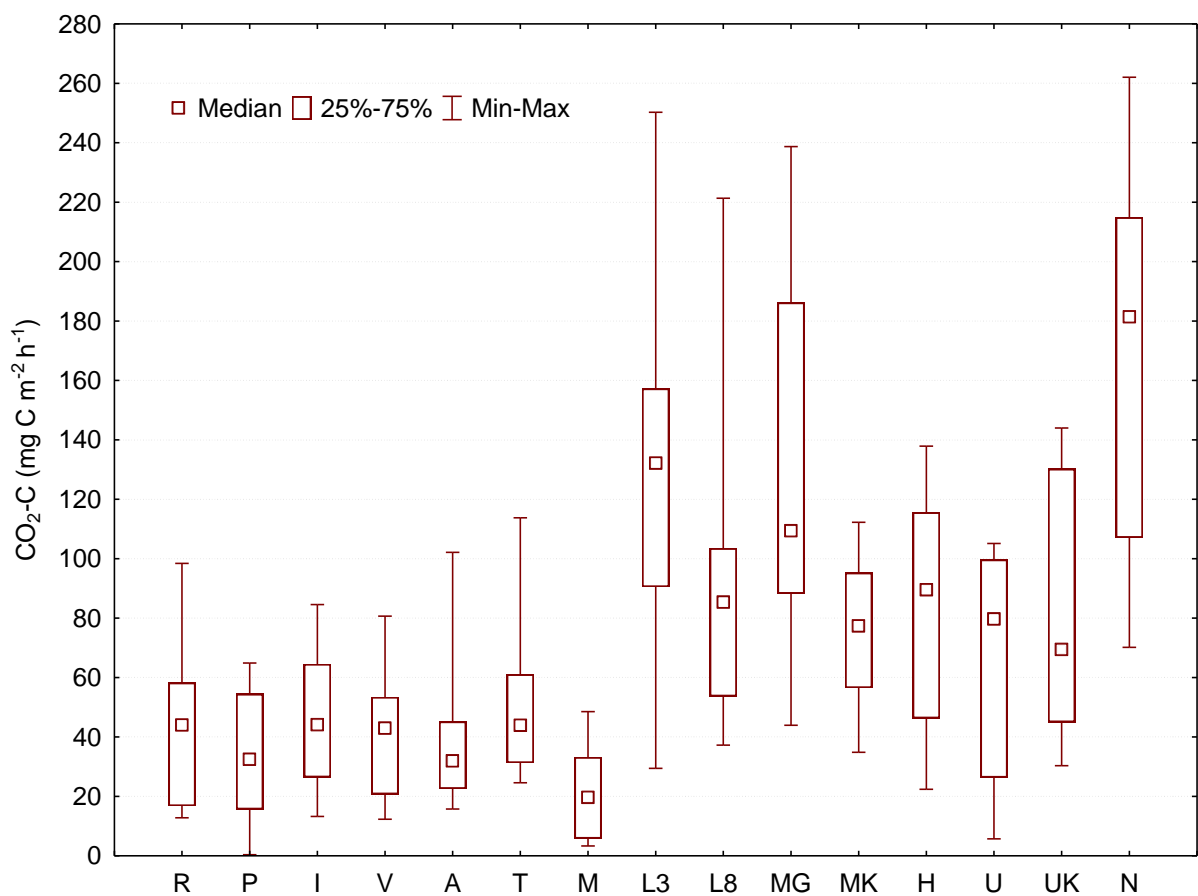
## 4. Tulemused

### 4.1. Mõõtmised staatilise suletud kambri meetodil

#### 4.1.1. Mõõtmisalade CO<sub>2</sub> vood

Mõõtmisperioodil (mai – september 2016) varieerusid keskmised süsihappegaasi emissioonid uurimisaladelt seitsmekordselt, olles Maaülikooli peahoone kergkruusakatusel 22,3 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> ning Naage looduslikul võrdlusalal 167,0 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

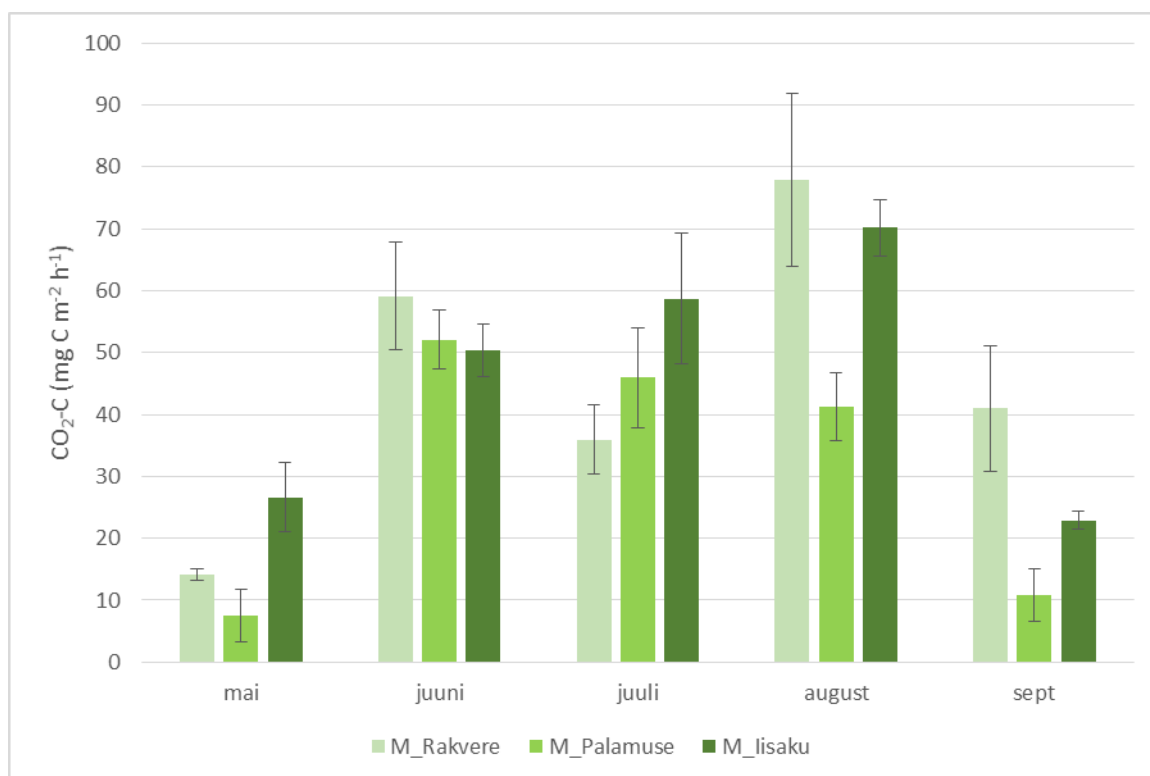
Naage võrdlusala CO<sub>2</sub> voo mediaanväärtuseks oli mõõteperioodil 181,4 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, mis oli kõikidest mõõtmisaladest suurim (Joonis 4). Haljaskatustest oli suurima CO<sub>2</sub> voo mediaanväärtusega Loomaaed-03 mätaskatus (132,2 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning väikseima CO<sub>2</sub> voo mediaanväärtusega Maaülikooli peahoone kergkruusapõhise substraadiga ekstensiivne haljaskatus (19,7 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).



**Joonis 4.** Mõõdetud CO<sub>2</sub> voo mediaan, 25-75% kvartiil ja miinimum-maksimum väärtused kõikide haljaskatuste ja loodusliku kontrollala kohta (n = 15). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

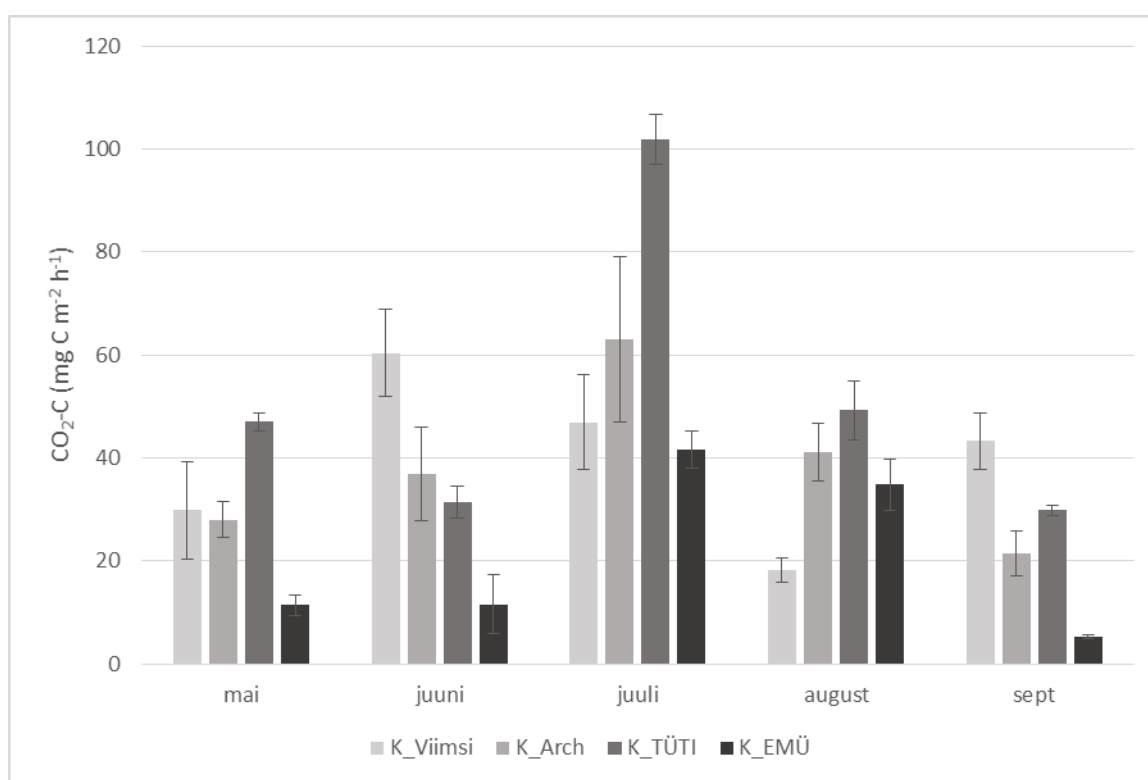
Maksimaalsete süsihappegaasi voogude võrdlemisel leiti, et suurimad ühekordsed CO<sub>2</sub> vood pärinevad Naage võrdlusalt (262,1 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning haljaskatuste puhul Loomaaed-03 katuselt (250,3 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Samuti paistsid kõrgete ühekordsete CO<sub>2</sub> voogudega silma ka Mägede keldri ning Loomaaed-08 haljaskatused, mille väärtused olid vastavalt 238,7 ning 221,3 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Kõik kolm eelmainitud haljaskatust kuuluvad seejuures mullapõhiste haljaskatuste klassi.

Joonisel 5 on välja toodud matipõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised CO<sub>2</sub> vood 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Juunis, augustis ja septembris mõõdeti suurim CO<sub>2</sub> emissioon Rakvere Eragümnaasiumi haljaskatuselt, mais ja juulis aga Iisaku Looduskeskuse haljaskatuselt. Klassi kõrgeim CO<sub>2</sub> emissioon mõõdeti augustis Rakvere haljaskatuselt, milleks oli 78,0 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Matipõhiste haljaskatuste klassi kogu mõõteperioodi madalaim süsihappegaasi emissioon mõõdeti maikuus Palamuse vallamaja haljaskatuselt, milleks oli 7,5 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Samuti olid Palamuse haljaskatuse CO<sub>2</sub> vood teiste katustega võrreldes märkimisväärselt madalamad ka augustis ja septembris.



**Joonis 5.** Matipõhiste haljaskatuste CO<sub>2</sub> vood. Vearibad näitavad standardviga (n = 3). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

Joonisel 6 on välja toodud kergkruusapõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised CO<sub>2</sub> vood 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Klassi kõrgeim CO<sub>2</sub> emissioon mõõdeti juulikuus Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi (TÜTI) haljaskatuselt, milleks oli 101,8 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Mais, juulis ja augustis olid kõrgeimad süsihappegaasi emissioonid TÜTI haljaskatuselt, juunis ja septembris aga Viimsi lasteaia haljaskatuselt. Kergkruusakatustest oli neljal kuul (mai, juuni, juuli, september) viiest kõige väiksema CO<sub>2</sub> emissiooniga Maaülikooli peahoone haljaskatus. Septembris Maaülikooli haljaskatuselt mõõdetud CO<sub>2</sub> emissioon (5,2 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) oli ühtlasi ka klassi madalaim.

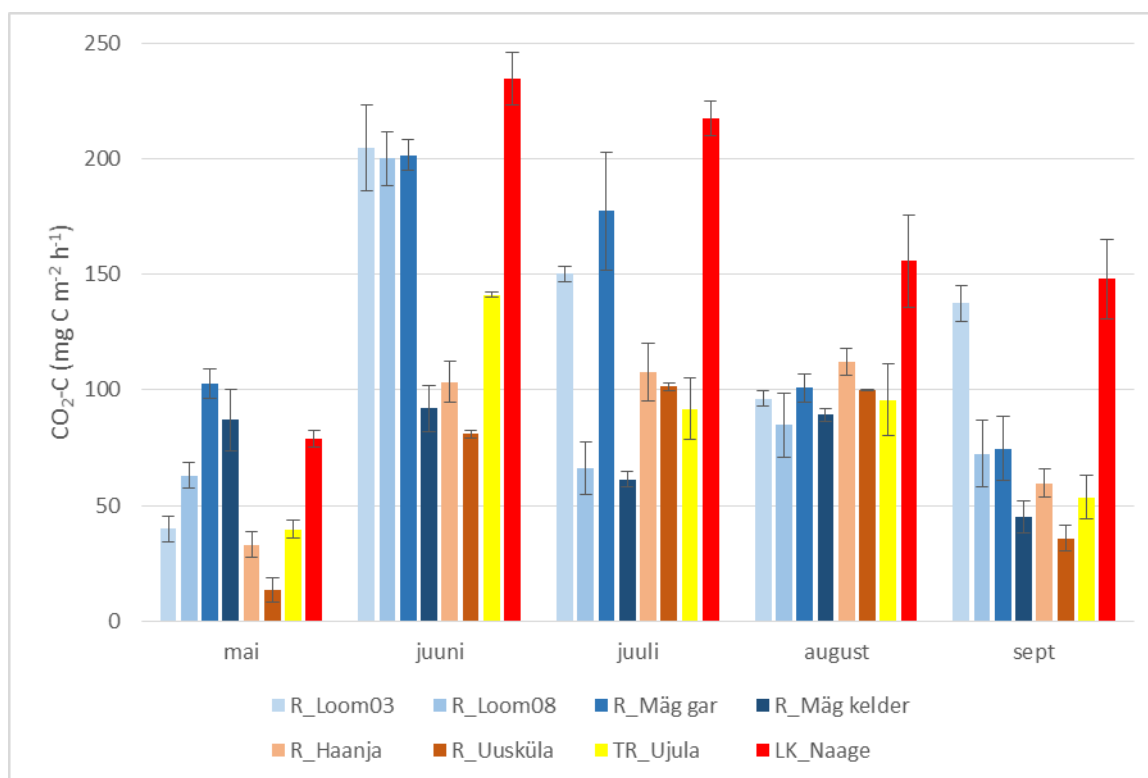


**Joonis 6.** Kergkruusapõhiste haljaskatuste CO<sub>2</sub> vood. Vearibad näitavad standardviga (n = 3). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

Joonisel 7 on välja toodud mullapõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised CO<sub>2</sub> vood koos loodusliku kontrollala keskmiste CO<sub>2</sub> voogudega 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Neljal mõõtekuul (juuni, juuli, august, september) viiest ületasid Naage kontrollala CO<sub>2</sub> vood haljaskatustelt mõõdetud süsihappegaasi voogusid. Naage kontrollala kõrgeim gaasivoog mõõdeti juunikuus, milleks oli 234,6 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Haljaskatustest pärinesid kõrgeimad CO<sub>2</sub> vood Loomaaed-03 katuselt, kus juunikuus mõõdeti voo suuruseks 204,8 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Kõrgete CO<sub>2</sub> voogudega paistsid juunikuus silma ka Loomaaed-08 ning Mägede garaaži haljaskatused,



kus voo suurusteks mõõdeti vastavalt 200,0 ning 201,4 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Mõõteperioodi kõige madalamad gaasivood registreeriti maikuu Uusküla haljaskatuselt, kus voo suuruseks mõõdeti 13,6 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Uusküla haljaskatus oli CO<sub>2</sub> emissioonide poolest madalaim ka juunis ning septembris. Augustikus olid haljaskatuste gaasivood kõige ühtlasemad ning jäid kõik omavahel võrdlemisi sarnasesse suurusjärku.



**Joonis 7.** Mullapõhiste haljaskatuste ning loodusliku kontrollala CO<sub>2</sub> vood. Vearibad näitavad standardviga (n = 3). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

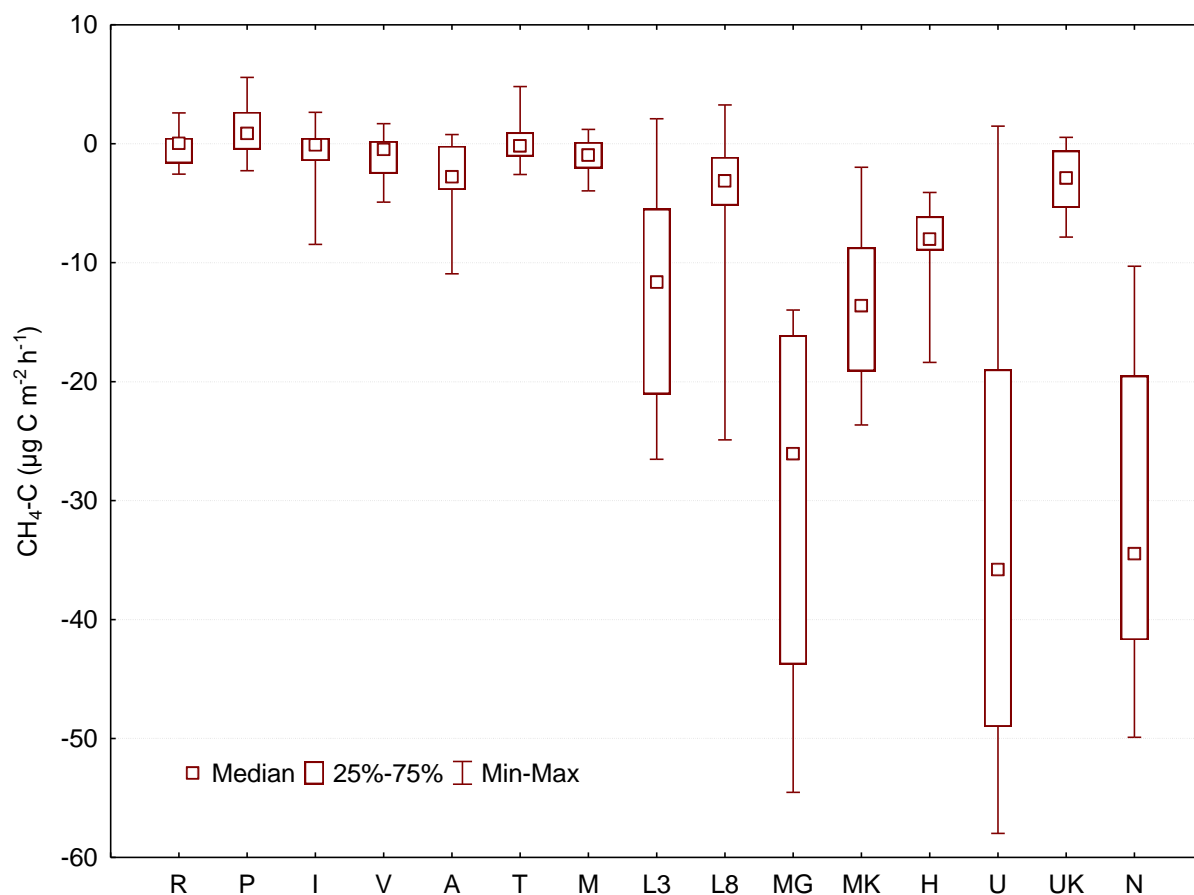
#### 4.1.2. Mõõtmisalade CH<sub>4</sub> vood

Mõõtmisperioodil (mai – september 2016) jäid keskmised metaani vood mõõtealadel vahemikku 1,0 (Palamuse) kuni -32,4 µg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Uusküla). Suurem osa uurimisaladest käitusid mõõteperioodil selgelt metaani oksüdeerijatena.

Suurimaks metaani oksüdeerijaks (Joonis 8) oli mõõteperioodil Uusküla haljaskatus, mille CH<sub>4</sub> voo mediaanväärtus oli -35,8 µg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Mõnevõrra väiksem negatiivne CH<sub>4</sub> voog oli Naage looduslikul kontrollalal, kus mediaanväärtuseks oli -34,5 µg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Haljaskatustest oli teine suurim metaani oksüdeerija Mägede garaaži haljaskatus (-26,1 µg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), mis kuulub koos

Uusküla haljaskatusega mullapõhiste haljaskatuste klassi. Ainus metaani emiteerija kogu mõõteperioodi lõikes oli Palamuse vallamaja matipõhine haljaskatus, mille mediaanväärtus oli  $0,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .

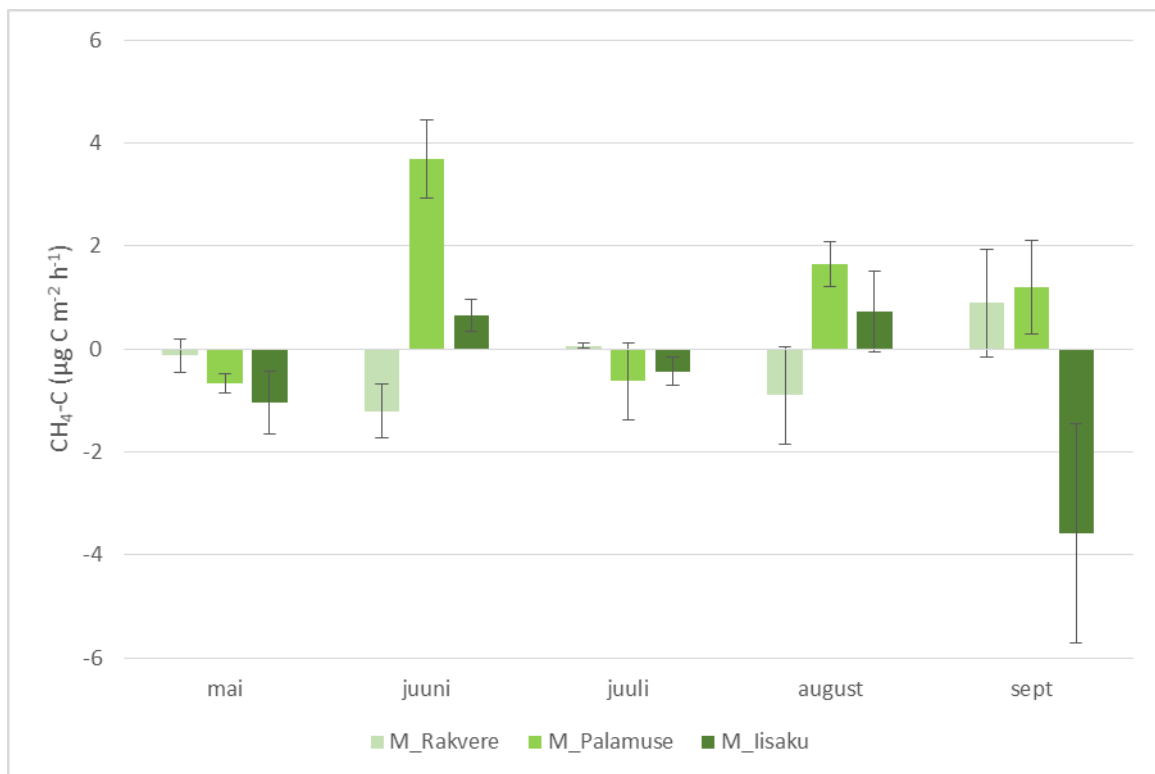
Suurim ühekordne metaani emissioon pärines Palamuse vallamaja haljaskatuselt, milleks oli  $5,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (Joonis 8). Samuti paistsid ühekordsete  $\text{CH}_4$  emissioonidega silma kergkruusapõhine TÜTI haljaskatus ning Loomaaed-08 haljaskatus, mis olid vastavalt 4,8 ja  $3,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Suurim ühekordne metaani oksüdeerimine toimus mullapõhisel Uusküla haljaskatusel ( $-58,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), kuid märkimisväärsed negatiivsed  $\text{CH}_4$  vood olid ka mullapõhisel Mägede garaaži haljaskatusel ( $-54,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) ning Naage looduslikul võrdlusalal ( $-49,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ).



**Joonis 8.** Mõõdetud  $\text{CH}_4$  voo mediaan, 25-75% kvartiil ja miinimum-maksimum väärtused kõikide haljaskatuste ja loodusliku kontrollala kohta ( $n = 15$ ). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

Joonisel 9 on välja toodud matipõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised  $\text{CH}_4$  vood 5-kuulise mõõteperioodi vältel. Ükski haljaskatustest ei käitunud mõõteperioodi vältel ainult metaani oksüdeerija või emiteerijana, vaid kuude lõikes toimus protsesside vaheldumine.

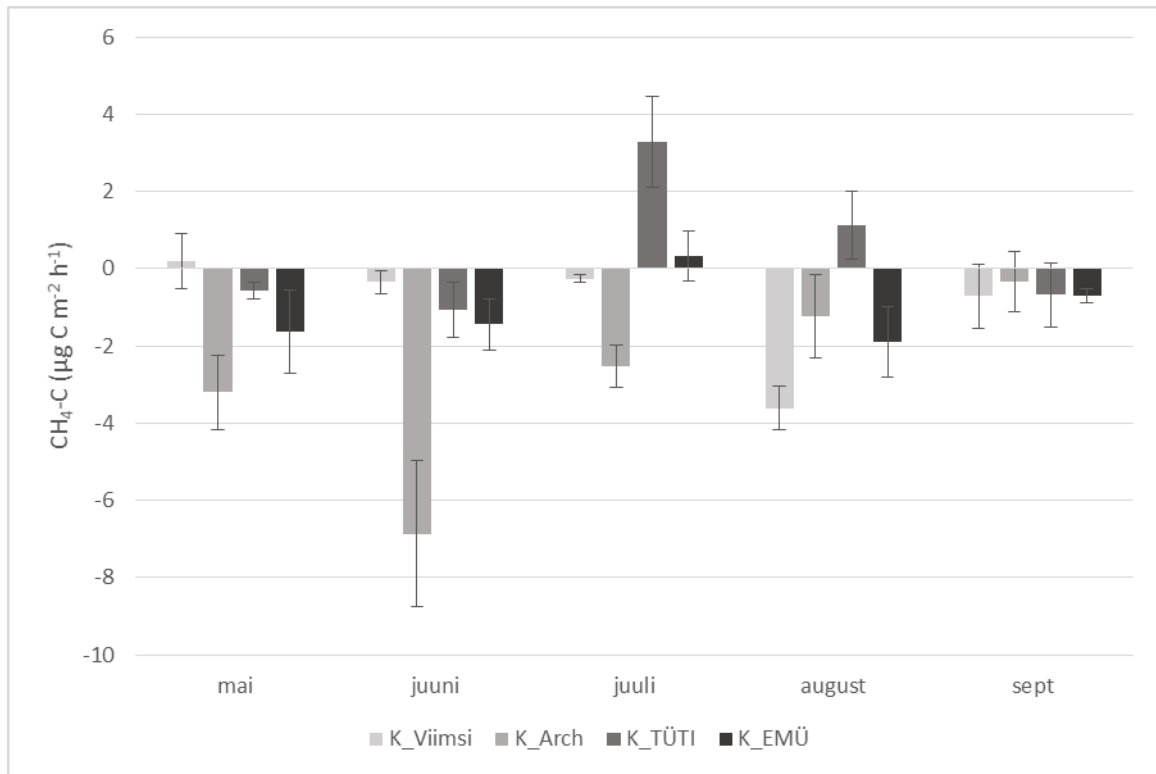
Klassi suurim metaani emissioon pärines juunikuus Palamuse vallamaja haljaskatuselt, milleks oli  $3,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Palamuse haljaskatus käitus suurima metaani emiteerijana ka augustis ja septembris, kus mõõdetud  $\text{CH}_4$  vood olid vastavalt 1,6 ning  $1,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Rakvere Eragümnaasiumi katus käitus metaani oksüdeerijana kolmel kuul (mai, juuni, august) viiest. Ka Iisaku Looduskeskuse katuse puhul täheldati kolmel kuul (mai, juuli, september) metaani negatiivset voogu ning septembrikuus käitus Iisaku katus ühtlasi klassi suurima oksüdeerijana, kus tulemuseks mõõdeti  $-3,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .



**Joonis 9.** Matipõhiste haljaskatuste  $\text{CH}_4$  vood. Vearibad näitavad standardviga ( $n = 3$ ). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

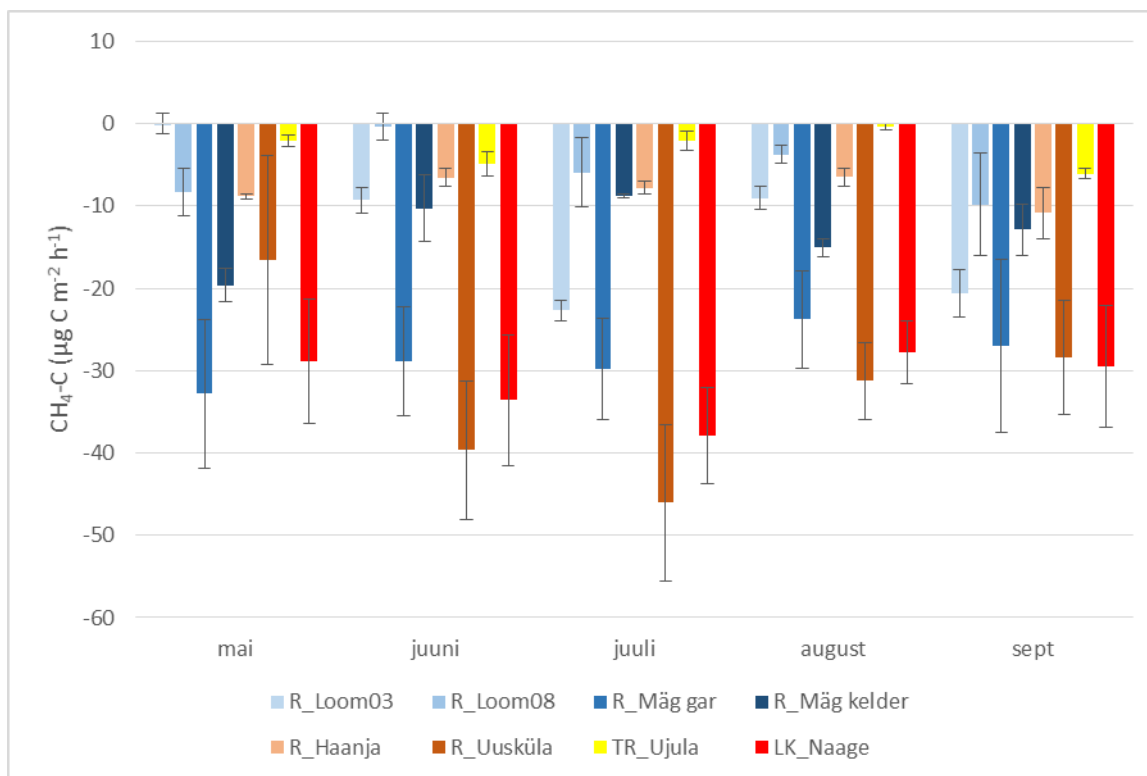
Joonisel 10 on välja toodud kergkruusapõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised  $\text{CH}_4$  vood 5-kuulise mõõteperioodi vältel. Juuni ning september olid ainsad kuud, kus kõik haljaskatused oksüdeerisid metaani, ülejäänud kuudel käitusid osad katused ka metaani emiteerijatena (Viimsi, TÜTI, EMÜ). Archimedese kergmurukatus käitus kõikidel kuudel  $\text{CH}_4$  oksüdeerijana ning oli juunikuus ühtlasi klassi suurimaks oksüdeerijaks, kus väärtuseks mõõdeti  $-6,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Märkimisväärse metaani oksüdeerijana käitus augustikuus Viimsi Lasteaia haljaskatus, kus tulemuseks mõõdeti  $-3,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Maaülikooli peahoone haljaskatusel oli  $\text{CH}_4$  voog negatiivne neljal mõõtekuul viiest (mai, juuni, august, september), millest madalaim väärtus oli augustis ( $-1,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Suurim metaani emissioon pärines

juulis Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi katuselt, milleks oli  $3,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Tehnoloogiainstituudi katuselt mõõdeti augustis ka teine mõõteperioodi suurem metaani emissioon, milleks oli  $1,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .



**Joonis 10.** Kergkruusapõhiste haljaskatuste  $\text{CH}_4$  vood. Vearibad näitavad standardviga ( $n = 3$ ). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

Joonisel 11 on välja toodud mullapõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised  $\text{CH}_4$  vood koos loodusliku kontrollala keskmiste  $\text{CH}_4$  voogudega 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Uurimisperioodil käitusid kõik mullapõhised haljaskatused ning ka Naage looduslik kontrollala metaani oksüdeerijatena. Mõõteperioodi suurim metaani oksüdeerimine toimus juulikuus Uusküla haljaskatusel, kus väärtuseks mõõdeti  $-46,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Uusküla haljaskatus oli suurimaks  $\text{CH}_4$  oksüdeerijaks ka juunis ja augustis, vastavalt  $-39,7$  ja  $-31,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Märkimisväärtusteks  $\text{CH}_4$  oksüdeerijateks olid ka Naage looduslik kontrollala ning Mägede garaaži haljaskatus. Naage alal oli madalaim metaani väärtus juulis ( $-37,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) ning Mägede garaaži haljaskatusel mais ( $-32,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Ühtlaselt madala metaani oksüdeerimisvõimega paistis mõõteperioodi jooksul silma Ujula Konsumi haljaskatus, mille väärtused väid vahemikku  $-0,4$  kuni  $-6,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .



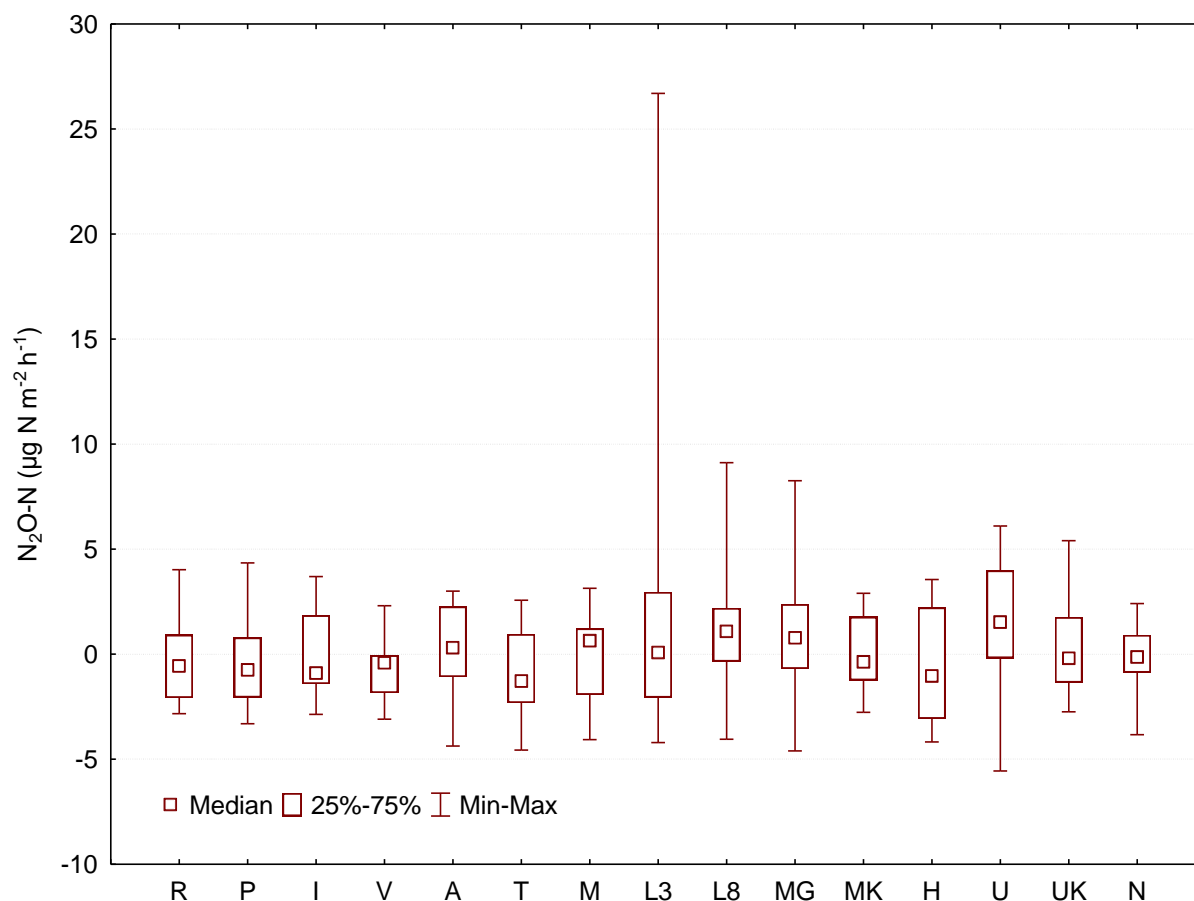
**Joonis 11.** Mullapõhiste haljaskatuste ning loodusliku kontrollala CH<sub>4</sub> vood. Vearibad näitavad standardviga (n = 3). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

#### 4.1.3. Mõõtmisalade N<sub>2</sub>O vood

Mõõtmisperioodil (mai – september 2016) jäid keskmised N<sub>2</sub>O vood mõõtealadel vahemikku 3,2 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Loomaaed-03) kuni -0,8 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (TÜTI). Matipõhised ning kergkruusapõhised haljaskatused käitusid mõõteperioodil pigem N<sub>2</sub>O sidujatena, samas mullapõhised haljaskatused olid pigem N<sub>2</sub>O emiteerijad. Naage looduslik võrdlusala oli mõõteperioodil N<sub>2</sub>O siduja (-0,16 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).

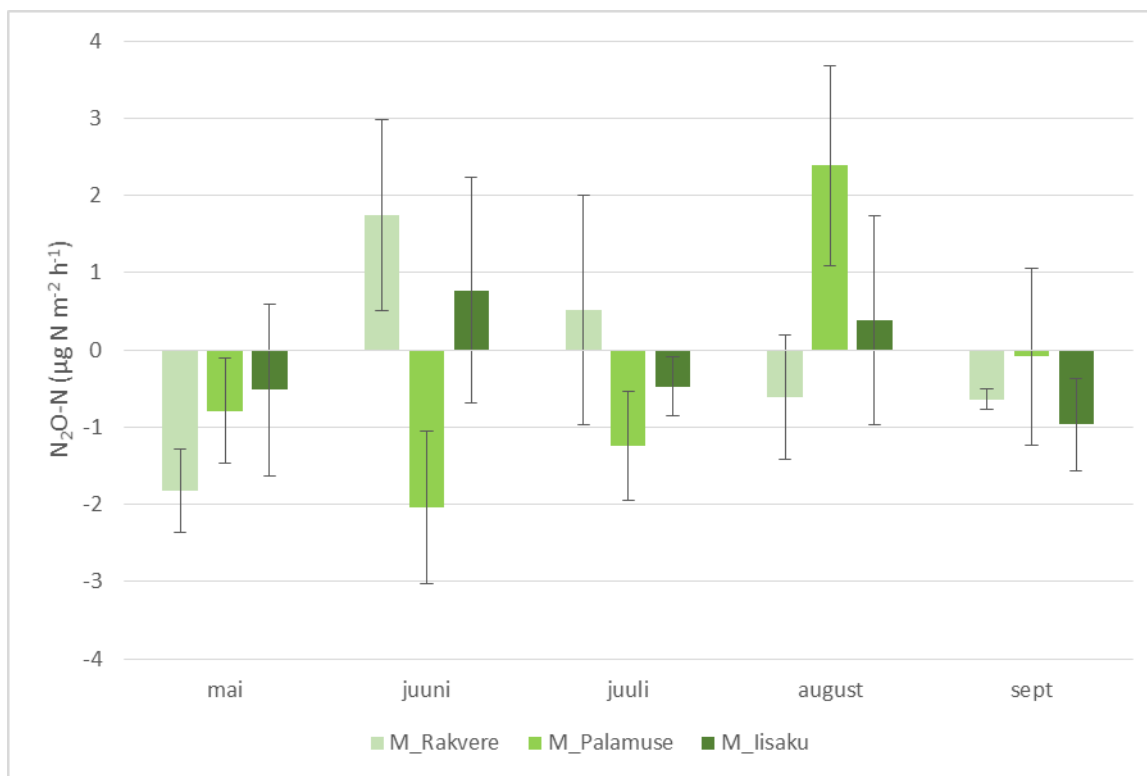
Uurimisaladest suurimaks N<sub>2</sub>O emiteerijaks oli Uusküla haljaskatus, mediaanväärtusega 1,5 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Joonis 12). Teisteks suuremateks emiteerijateks olid Loomaaed-08 katus (1,1 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), Mägede garaaži katus (0,8 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning Maaülikooli peahoone katus (0,6 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Kolm suurima N<sub>2</sub>O emissiooniga katust (Uusküla, Loomaaed-08, Mägede) kuuluvad kõik mullapõhiste haljaskatuste klassi. Mõõteperioodi suurimaks N<sub>2</sub>O sidujaks oli Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi (TÜTI) haljaskatus, mediaanväärtusega -1,3 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Märkimisväärsed sidujateks olid ka Haanja (-1 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ja Iisaku haljaskatus (-0,9 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).

Suurimad ühekordsed N<sub>2</sub>O emissioonid pärinevad Loomaaed-03 haljaskatuselt, mille väärtuseks oli 26,7 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Joonis 12). Kõrgeid ühekordseid emissioone täheldati ka Loomaaed-08 katuse puhul (9,1 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning Mägede garaaži haljaskatuse puhul (8,3 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Suurim ühekordne sidumine toimus Uusküla haljaskatusel (−5,6 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).



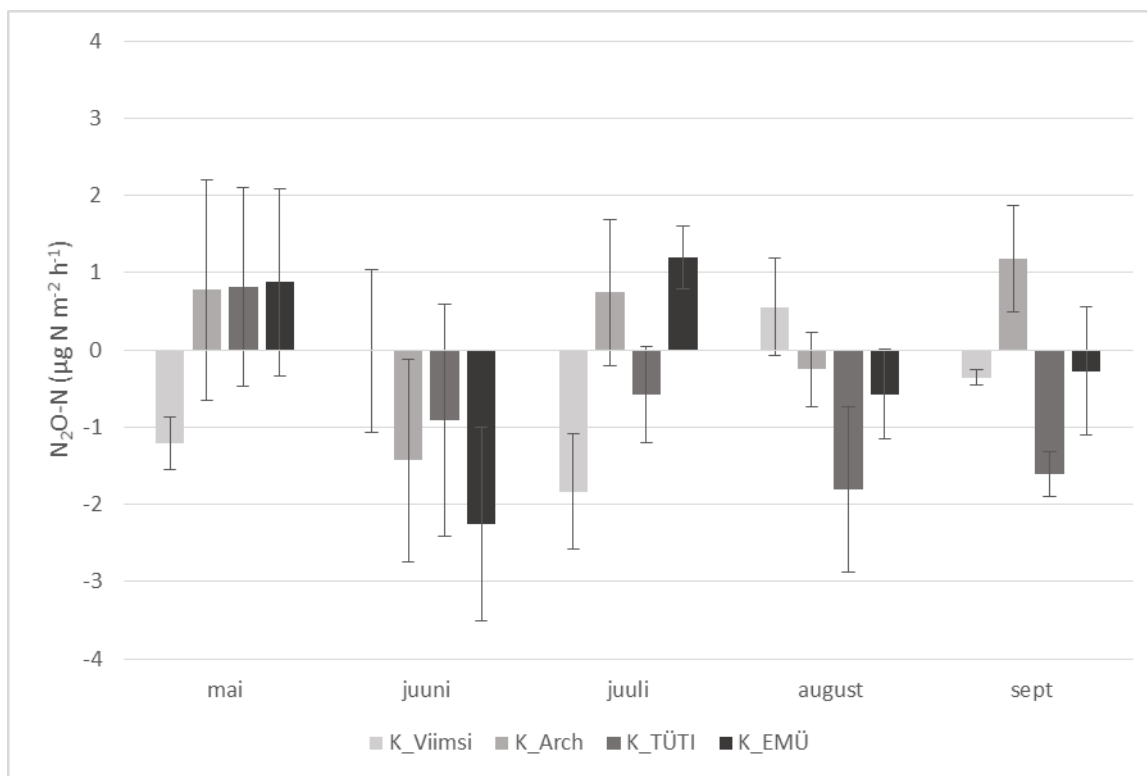
**Joonis 12.** Mõõdetud N<sub>2</sub>O voo mediaan, 25-75% kvartiil ja miinimum-maksimum väärtused kõikide haljaskatuste ja loodusliku kontrollala kohta (n = 15). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

Joonisel 13 on välja toodud matipõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised N<sub>2</sub>O vood 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Mais ja septembris käitusid kõik matipõhise klassi haljaskatused N<sub>2</sub>O sidujatena. Mõõteperioodi suurim N<sub>2</sub>O sidumine toimus juunikuus Palamuse vallamaja haljaskatusel, väärtusega −2,0 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Märkimisväärne sidumine toimus ka maikuus Rakvere katusel, väärtusega −1,8 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Mõõteperioodi suurim emiteerimine toimus augustis Palamuse vallamaja haljaskatuselt, kus väärtuseks oli 2,4 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Kõrge N<sub>2</sub>O emissiooniga paistis juunis silma Rakvere haljaskatus (1,7 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).



**Joonis 13.** Matipõhiste haljaskatuste N<sub>2</sub>O vood. Vearibad näitavad standardviga (n = 3). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

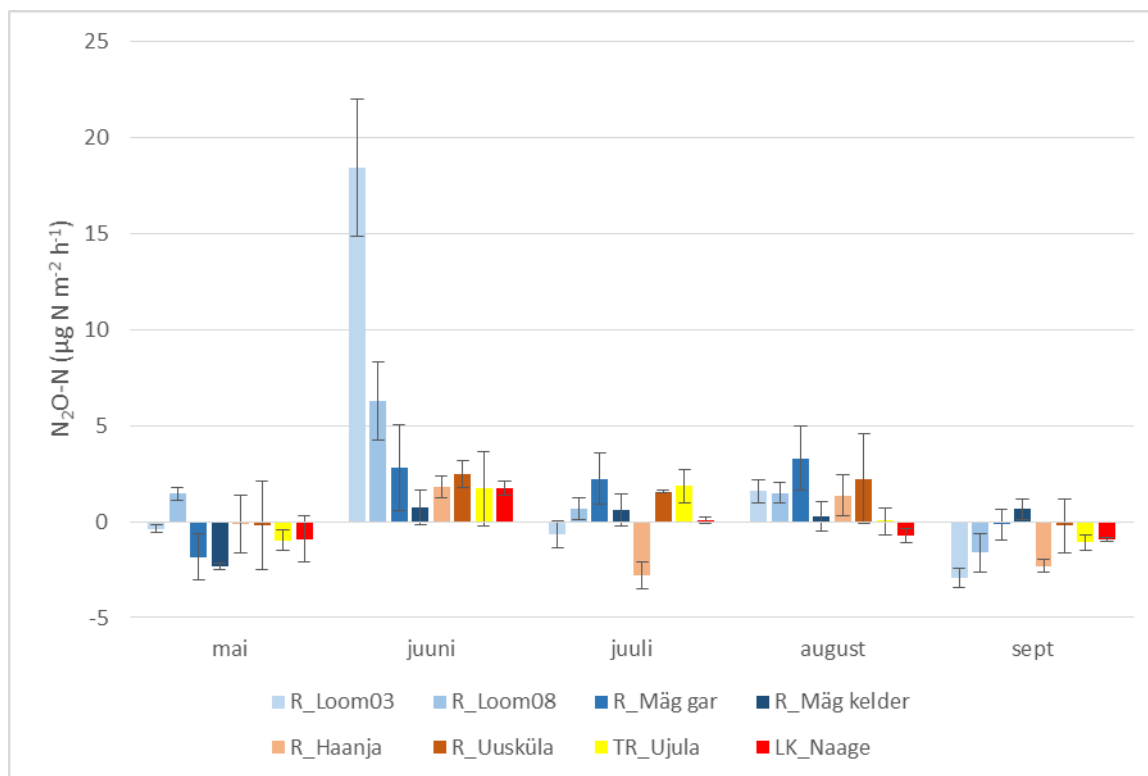
Joonisel 14 on välja toodud kergkruusapõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised N<sub>2</sub>O vood 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Mõõteperioodil vaheldus kuude lõikes N<sub>2</sub>O emiteerimine ja sidumine. Mais käitusid kolm katust neljast N<sub>2</sub>O emiteerijatena (Archimedes, TÜTI, EMÜ) ning juunis käitusid samad katused jällegi sidujatena. Mõõteperioodi suurimad emissioonid pärinesid juulikuus Maaülikooli peahoone haljaskatuselt (1,2 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning septembris Archimedese haljaskatuselt (1,2 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Suurim N<sub>2</sub>O sidumine toimus juunikuus Maaülikooli haljaskatusel, väärtusega -2,2 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Oluliste sidujatena käitusid ka Viimsi Lasteaia haljaskatus juulis (-1,8 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ja TÜTI haljaskatus augustis (-1,8 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning septembris (-1,6 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).



**Joonis 14.** Kergkruusapõhiste haljaskatuste N<sub>2</sub>O vood. Vearibad näitavad standarddviaga (n = 3). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

Joonisel 15 on välja toodud mullapõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised N<sub>2</sub>O vood koos loodusliku kontrollala keskmiste N<sub>2</sub>O voogudega 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Antud klassi kuuluvad haljaskatused käitusid mõõteperioodil nii dilämmastikoksiidi sidujatena kui ka emiteerijatena. Juunikuus käitusid kõik haljaskatused N<sub>2</sub>O emiteerijatena. Mõõteperioodi suurim N<sub>2</sub>O emissioon pärines juunis Loomaaed-03 haljaskatuselt, väärtusega 18,4 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Teisteks suuremateks emiteerijateks olid Loomaaed-08 haljaskatus juunis (6,3 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning Mägede garaaži haljaskatus augustis (3,3 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Suurim N<sub>2</sub>O sidumine mõõteperioodil toimus septembris Loomaaed-03 haljaskatusel, väärtusega -2,9 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Teisteks suuremateks sidujateks olid Haanja katus juulis (-2,8 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning Mägede keldri katus mais (-2,3 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Naage looduslik kontrollala toimus kolmel mõõtekuul (mai, august, september) N<sub>2</sub>O sidujana ning ülejäänud kahel emiteerijana. Naage loopealse maksimaalne N<sub>2</sub>O emissioon oli 1,7 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (juuni) ning maksimaalne sidumine -0,9 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (mai, september).





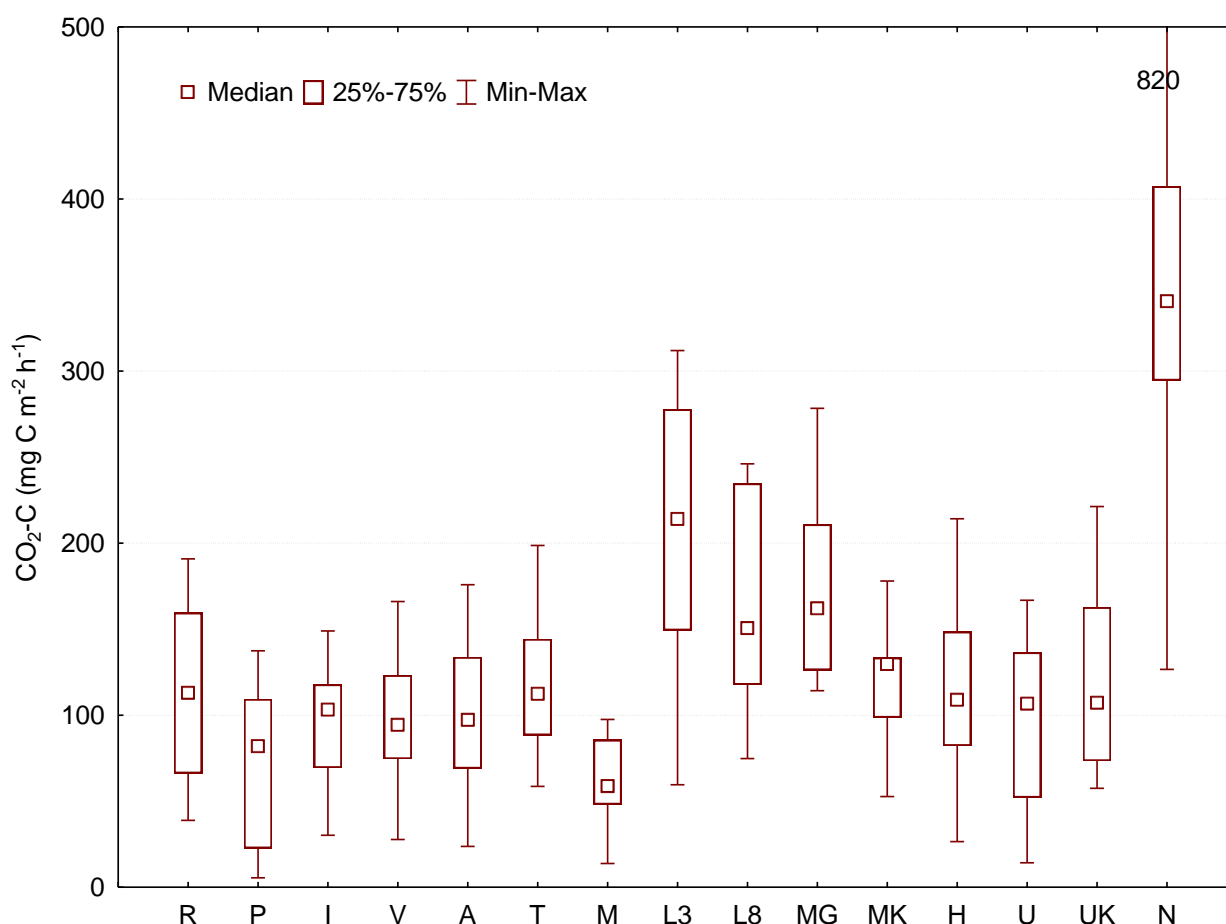
**Joonis 15.** Mullapõhiste haljaskatuste ning loodusliku kontrollala N<sub>2</sub>O vood. Vearibad näitavad standardviga (n = 3). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

## 4.2. Mõõtmised dünaamilise suletud kambri meetodil

Kaetud dünaamilise kambriga mõõdetud CO<sub>2</sub> vood väljendavad ökosüsteemi hingamist (ER – *ecosystem respiration*). Mõõtmisperioodil kaetud dünaamilise kambriga mõõdetud keskmised CO<sub>2</sub> vood varieerusid mõõtealadel kuuekordselt, olles Maaülikooli peahoone haljaskatusel 59,7 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> ning Naage looduslikul kontrollalal keskmiselt 380,2 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

Naage loodusliku kontrollala CO<sub>2</sub> voo mediaanväärtus oli mõõteperioodil 340,6 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, mis oli kõikide mõõtealade suurim väärtus (Joonis 16). Haljaskatustest oli suurima CO<sub>2</sub> voo mediaanväärtusega Loomaaed-03 haljaskatus (213,9 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning väikseima väärtusega Maaülikooli peahoone haljaskatus (58,8 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).

Maksimaalsete süsihappegaasi voogude võrdlemisel leiti, et mõõteperioodi suurimad ühekordsed CO<sub>2</sub> vood pärinesid Naage looduslikult kontrollalalt (820,0 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Haljaskatustest pärinesid suurimad ühekordsed süsihappegaasi vood Loomaaed-03 katuselt (312,0 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Märkimisväärsete ühekordsete voogudega paistsid silma ka Mägede garaaži haljaskatus (278,3 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning Loomaaed-08 haljaskatus (246,1 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).



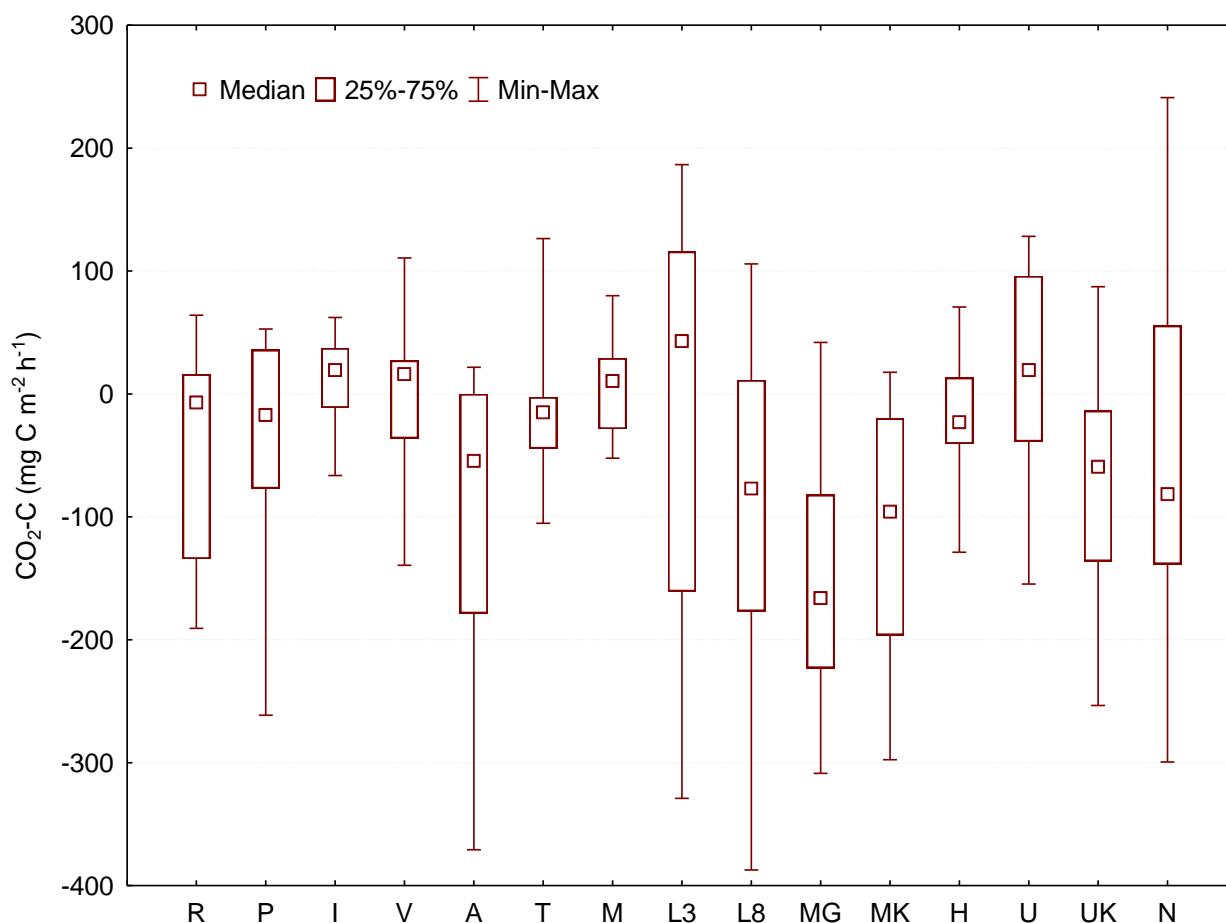
**Joonis 16.** Kaetud dünaamilise kambriga mõõdetud CO<sub>2</sub> voo mediaan, 25-75% kvartiil ja miinimum-maksimum väärtused kõikide haljaskatuste ja loodusliku kontrollala kohta (n = 15). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

Läbipaistva dünaamilise kambriga mõõdetud tulemused väljendavad CO<sub>2</sub> sidumist taimede poolt ning mullahingamist (NEE – *net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange*). Mõõteperioodil läbipaistva dünaamilise kambriga mõõdetud keskmised CO<sub>2</sub> vood jäid vahemikku 18,3 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Uusküla) kuni –142,4 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Mägede garaaž). Mägede garaaži kõrval oli teine suurim CO<sub>2</sub> siduja Mägede keldri katus, mille keskmiseks CO<sub>2</sub> vooks mõõdeti –113,6 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

Läbipaistva dünaamilise kambriga mõõtmistel oli mõõteperioodi suurima CO<sub>2</sub> mediaanväärtusega Loomaaed-03 haljaskatus (42,8 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) (Joonis 17). Peale Loomaaed-03 katuse olid suuremateks emiteerijateks veel Uusküla katus (19,5 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning Iisaku katus (19,4 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Suurimaks CO<sub>2</sub> sidujaks oli Mägede garaaži haljaskatus, mediaanväärtusega –166,2 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Teisteks suurimateks sidujateks olid Mägede keldri katus (–95,9 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning Naage looduslik võrdlusala (–81,7 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).

Kõrgeimad ühekordsed süsihappegaasi emissioonid mõõdeti Naage looduslikult võrdlusalalt (241,1 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Haljaskatustest pärinesid kõrgeimad ühekordsed CO<sub>2</sub> emissioonid

Loomaaed-03 haljaskatuselt ( $186,6 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Suurim ühekordne sidumine toimus Loomaaed-08 haljaskatusel ( $-387,2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ).

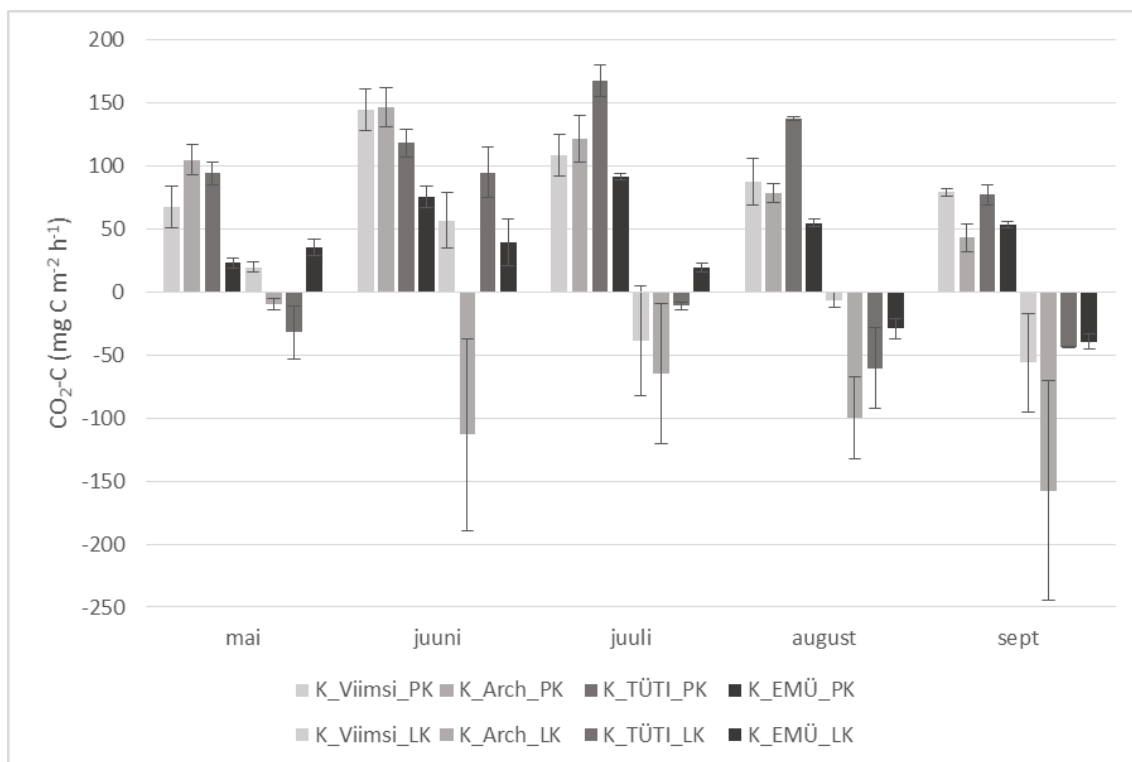


**Joonis 17.** Läbipaistva dünaamilise kambri mõõdetud CO<sub>2</sub> voo mediaan, 25-75% kvartiil ja miinimum-maksimum väärtused kõikide haljaskatuste ja loodusliku kontrollala kohta (n = 15). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

Joonisel 18 on kujutatud matipõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised CO<sub>2</sub> vood mõõdetuna pimedas (PK) ja läbipaistvas (LK) dünaamilise kambri 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Mais ühegi katuse puhul sidumist ei esinenud. Juunis, juulis ja augustis käitusid samuti kõik katused süsihappegaasi emiteerijana. Septembris ületas Palamuse ja Rakvere katuste puhul sidumine ökosüsteemi hingamise ning katused käitusid nimetatud kuul süsihappegaasi sidujatena. Iisaku Looduskeskuse katus käitus septembris endiselt CO<sub>2</sub> emiteerijana.



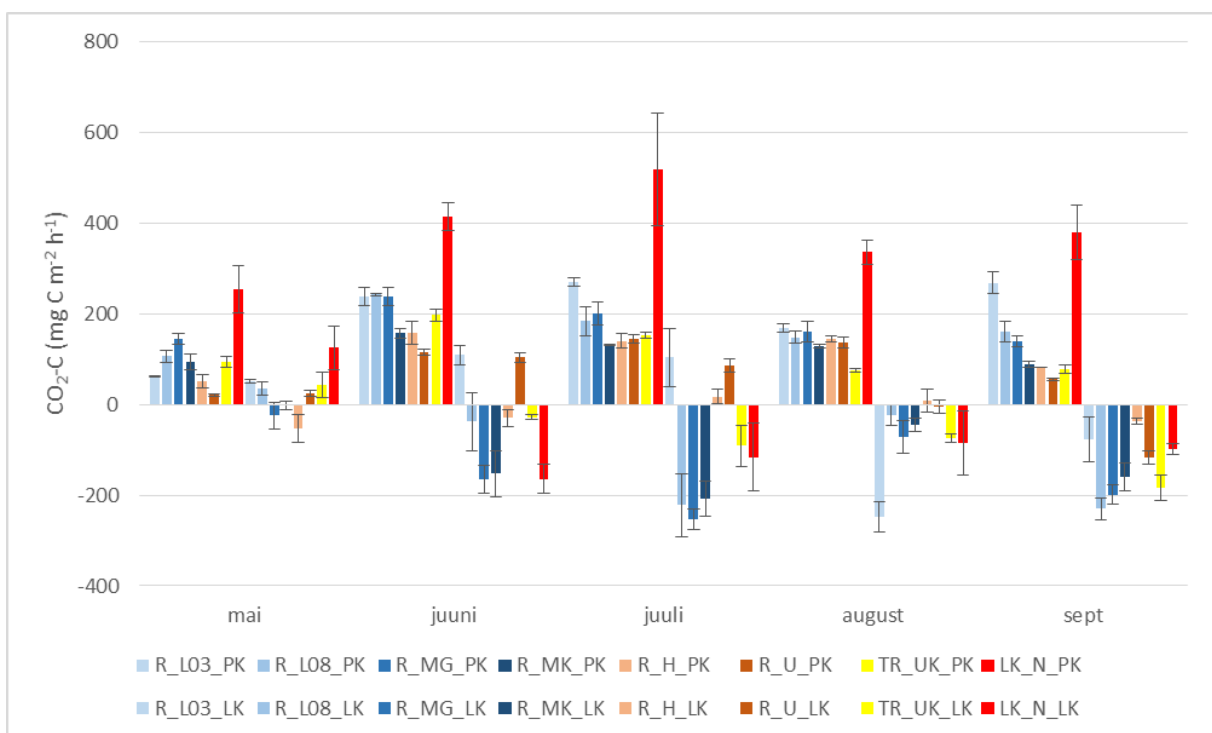
**Joonis 18.** Matipõhiste haljaskatuste CO<sub>2</sub> vood mõõdetuna kaetud (PK, kolm esimest tulpa igal kuul) ja läbipaistva (LK, kolm järgmist tulpa igal kuul) dünaamilise kambriga. Vearibad näitavad standarddiga (n = 3). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.



**Joonis 19.** Kergkruusapõhiste haljaskatuste CO<sub>2</sub> vood mõõdetuna kaetud (PK, neli esimest tulpa igal kuul) ja läbipaistva (LK, neli järgmist tulpa igal kuul) dünaamilise kambriga. Vearibad näitavad standarddiga (n = 3). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

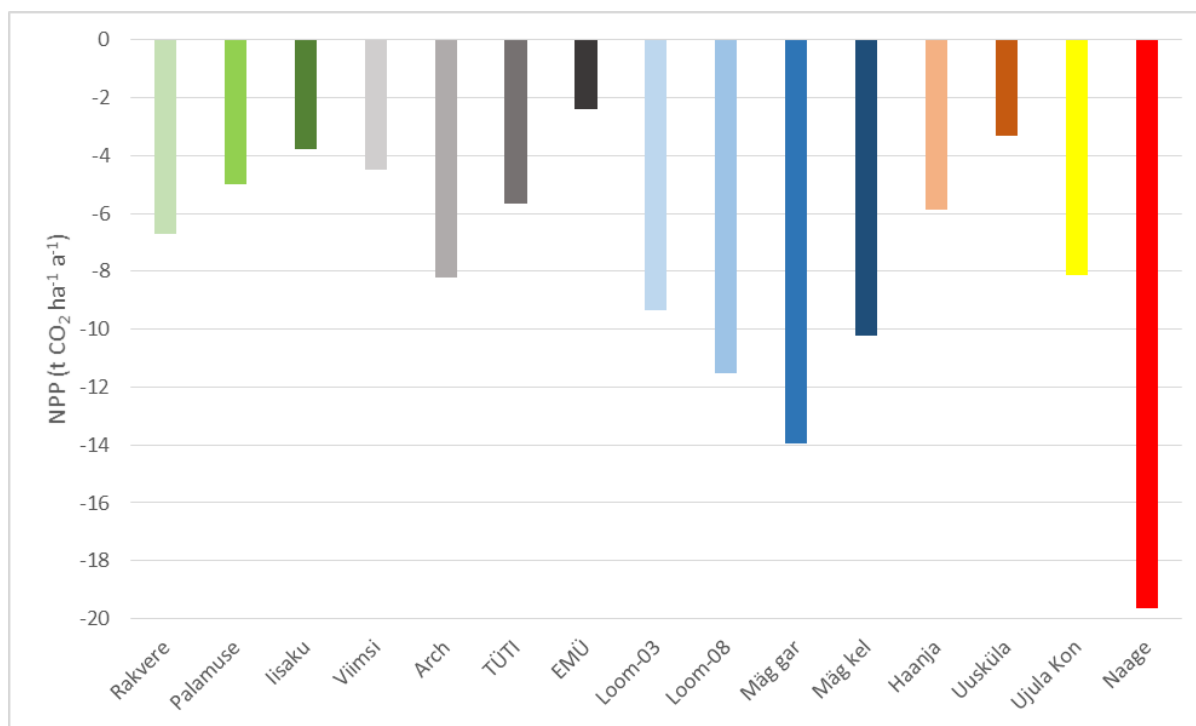
Joonisel 19 on kujutatud kergkruusapõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste keskmised CO<sub>2</sub> vood mõõdetuna kaetud (PK) ja läbipaistva (LK) dünaamilise kambriga 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Mais, juunis ja juulis käitusid kõik katused süsihappegaasi emiteerijana. Nii augustis kui septembris käitus Archimedes ainsana neljast kergkruusakatusest süsihappegaasi sidujana.

Joonisel 20 on kujutatud mullapõhiste haljaskatuste klassi kuuluvate katuste ning loodusliku kontrollala keskmised CO<sub>2</sub> vood mõõdetuna kaetud (PK) ja läbipaistva (LK) dünaamilise kambriga 5-kuulise mõõteperioodi jooksul. Mais käitusid mõõtekuu ainsate süsihappegaasi sidujatena Haanja ja Uusküla katused. Juunis käitusid kõik klassi kuuluvad katused ning looduslik mõõteala CO<sub>2</sub> emiteerijatena. Juulikuus käitusid sidujatena kolm haljaskatust seitsmest (Loomaaed-08, Mägede garaaž, Mägede kelder). Augustis käitusid CO<sub>2</sub> sidujatena Loomaaed-03 ja Uusküla haljaskatused. Septembris käitus suurem osa katustest süsihappegaasi sidujana (Loomaaed-08, Mägede garaaž, Mägede kelder, Uusküla, Ujula Konsum). Naage looduslik kontrollala käitus kogu 5-kuulise perioodi jooksul emiteerijana.



**Joonis 20.** Mullapõhiste haljaskatuste ning loodusliku kontrollala CO<sub>2</sub> vood mõõdetuna kaetud (PK, kaheksa esimest tulpal igal kuul) ja läbipaistva (LK, kaheksa järgmist tulpal igal kuul) dünaamilise kambriga. Vearibad näitavad standarddviaga ( $n = 3$ ). Kasutatud lühendid on selgitatud Tabelis 1 leheküljel 25.

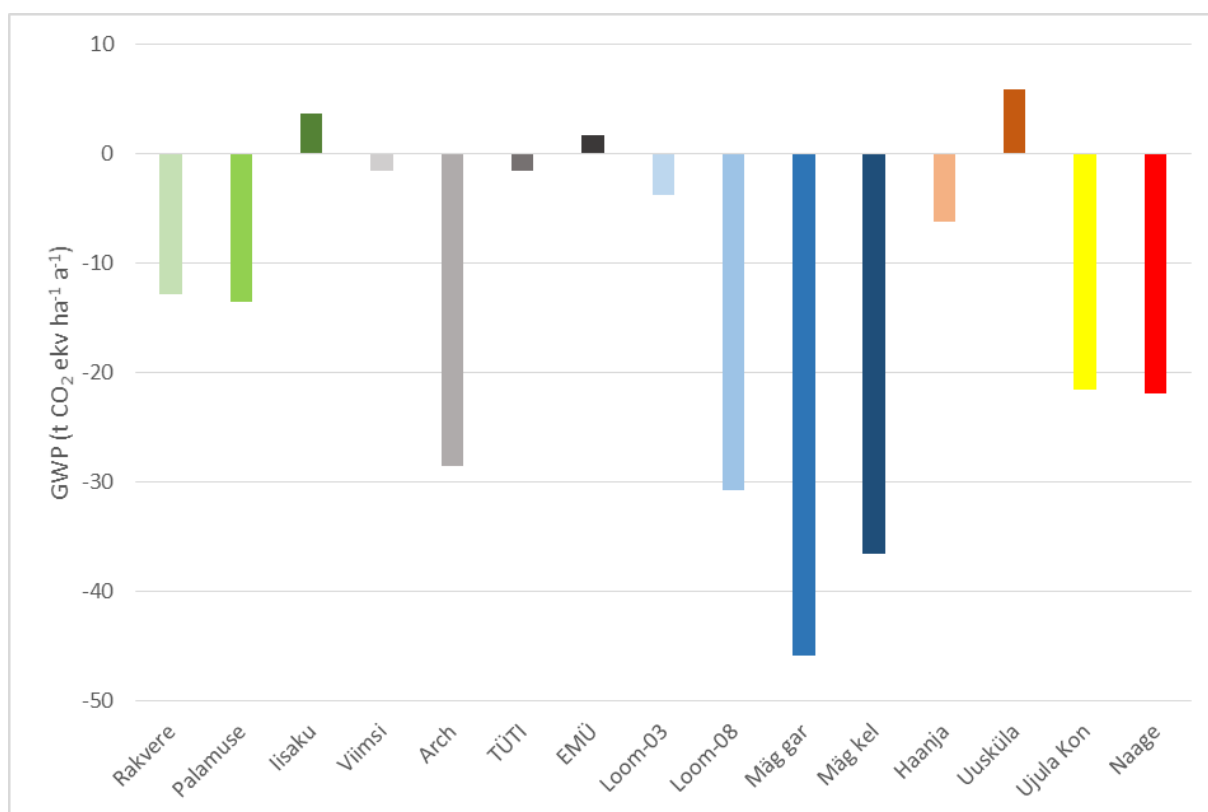
Kõikide katuste kohta arvutati aasta kohta välja hinnanguline netoprimaarprodukttsioon (NPP – *net primary production*) mõõdetud viie kuu tulemuste alusel (Joonis 21). Madalamad olid NPP tulemused õhukeste mattkatuste ja kergkruusakatuste osas (keskmised vastavalt  $-5,15$  ja  $-5,20$  t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>), kõrgemad mätaskatuste osas (keskmise  $-9,04$  t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>). Kõige kõrgema tulemusega (kõige negatiivsema väärtusega) oli Naage loopealne ( $-19,62$  t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>).



**Joonis 21.** Haljaskatuste ning loodusliku kontrollala netoprimaarprodukttsioon (t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) arvutatuna ühe aasta kohta.

Võttes arvesse lisaks CO<sub>2</sub> bilansile ka metaani ja diämmastikoksiidi tulemusi CO<sub>2</sub> ekvivalentidesse ümberarvutatuna (1 kg CH<sub>4</sub> = 28 kg CO<sub>2</sub> ekv, 1 kg N<sub>2</sub>O = 265 kg CO<sub>2</sub> ekv; IPCC, 2014), on näha, et kolme haljaskatuse globaalse soojenemise potentsiaal (GWP – *global warming potential*) on positiivne, teistel katustel negatiivne (Joonis 22). Uusküla, Iisaku ja EMÜ katused ei olnud efektiivsed CO<sub>2</sub> sidujad ja see asjaolu põhjustas antud alade kasvuhoonegaaside positiivse bilansi. Üsna napilt negatiivse GWP tulemusega TÜTI ja Haanja katuse puhul tuleb rõhutada, et tegu on pidevalt varjus olevate katustega ning ka taimestiku CO<sub>2</sub> sidumise mõõtmise toimus varjutingimustes. Rakvere ja Palamuse mattkatused on sarnase õhukesele katusetüübile kohase GWP tulemusega. Viimsi ja Archimedese katuse tulemuste erinevus on seotud Archimedese katusel ühes mõõtmisrõngas olnud nõmm-liivatee puhmase efektiivse sidumisega võrreldes vähesemate taimedega Viimsi katusel olnud rõngastes.

Loomaaed-08 ja Mägede katuste lopsaka taimestiku efektiivsest CO<sub>2</sub> sidumisest on põhjustatud väga hea GWP tulemus, võrreldes Loomaaed-03-ga, kus esines arvukalt kuivanud aruheina taimede kõrsi, mis pärssisid sidumise efektiivsust. Mätaskatuste keskmine kasvuhoonegaaside bilanss ( $-19,55 \text{ t CO}_2 \text{ ekv ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) oli siiski sarnane loodusliku kontrollala tulemusega ( $-21,88 \text{ t CO}_2 \text{ ekv ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ). Mattkatuste keskmine GWP ( $-7,57 \text{ t CO}_2 \text{ ekv ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) oli sarnane kergkruusapõhiste haljaskatustega ( $-7,51 \text{ t CO}_2 \text{ ekv ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ), kuid nagu jooniselt 22 näha, on antud seitsme katuse kasvuhoonegaaside bilanss siiski väga varieeruv ning sõltuv eelpool toodud asjaoludest. Tuleb siiski arvestada ka asjaolu, et antud teisendus kogu aasta kohta on tehtud vaid viie vegetatsiooniperioodi kuu alusel ning tegelik tulemus võib sellest mõnevõrra erineda.

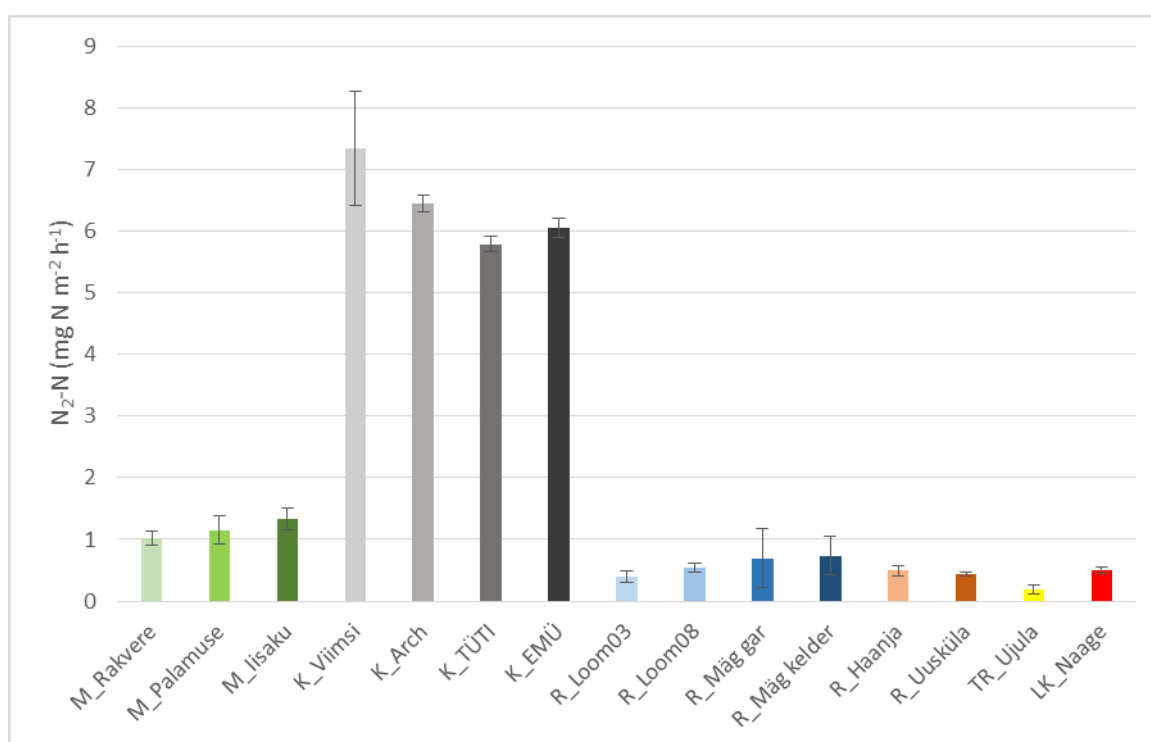


**Joonis 22.** Haljaskatuste ja loodusliku kontrollala kasvuhoonegaaside bilanss globaalse soojenemise potentsiaalina (GWP; t CO<sub>2</sub> ekv ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) väljendatult.

### 4.3. Substraadiproovide gaasivood

Joonisel 23 on välja toodud HeO meetodil haljaskatuste ja loodusliku kontrollala substraatidest määratud keskmised N<sub>2</sub> vood. Palamuse, Rakvere ja Iisaku matipõhised katused näitasid N<sub>2</sub> voogude puhul sarnaseid tulemusi, mis jäid vahemikku 1,0 – 1,3 mg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Kõige kõrgemad

N<sub>2</sub> vood pärinesid kergkruusakatustelt (Viimsi, Archimedes, TÜTI, EMÜ), mille tulemused jäid vahemikku 5,8 – 7,3 mg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Sarnaselt matipõhiste katustele olid võrdlemisi ühtlased ka mullapõhiste katuste N<sub>2</sub> vood, jäädes vahemikku 0,19 – 0,74 mg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Naage loodusliku võrdlusala N<sub>2</sub> voog oli 0,49 mg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Substraadiproovidest määratud katusetüüpide keskmised CO<sub>2</sub> voo tulemused olid matt-, kergkruusa- ja mullapõhistel katustel ning Naagel vastavalt 1,90, 3,54, 7,95 ja 16,65 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Substraadiproovidest määratud CH<sub>4</sub> vood olid matt-, kergkruusa- ja mullapõhistel katustel ning Naagel vastavalt –0,09, –0,23, –2,82 ja –9,63 µg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Substraadiproovidest määratud N<sub>2</sub>O vood olid matt-, kergkruusa- ja mullapõhistel katustel ning Naagel vastavalt 0,15, 0,07, 0,22 ja 0,08 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.



**Joonis 23.** Substraadiproovidest mõõdetud N<sub>2</sub> vood. Vearibad näitavad standardviga (n = 3).

#### 4.4. Gaasivoogude seosed ilmaandmete ja muude parameetritega

Tabelis 2 on välja toodud Spearmani astakkorrelatsiooni tulemused mõõdetud gaasivoogude, ilmaandmete, katuste omaduste ning muude mõõdetud parameetrite vahel. Süsihappegaasi puhul olid tugevaimad seosed katuse tüübi ja substraadi niiskusega. Mõnevõrra vähem oli süsihappegaas seotud substraadi elektrijuhtivusega, metaaniga (neg), substraadi paksusega, õhutemperatuuriga (2 n, 1 n, 24 h enne) sademetega (2 n, 1 n, 24 h enne), suhtelise niiskusega, katuse kaldega ja N<sub>2</sub>O vooga. Metaani puhul olid tugevaimad seosed katuse tüübiga (neg) ja



süsihappegaasi voogudega (neg). Mõnevõrra nõrgemad seosed esinesid substraadi paksusega (neg), katuse kaldega (neg), substraadi niiskusega (neg) ja elektrijuhtivusega (neg) ning katuse vanusega. Naerugaasi puhul olid tugevaimad seosed sademetega (2 n, 1 n, 24 h enne) ning õhutemperatuuriga (2 n enne). Mõnevõrra nõrgemad olid seosed CO<sub>2</sub> voogudega ning katuse kaldega.

**Tabel 2.** Spearmani astakkorrelatsioon gaasivoo ning keskkonna- ja muude parameetrite vahel. Olulised korrelatsioonid on märgitud punasega ( $p < 0,05$ ).

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
CO <sub>2</sub>	1,000000	-0,521545	0,193015
CH <sub>4</sub>	-0,521545	1,000000	-0,089045
N <sub>2</sub> O	0,193015	-0,089045	1,000000
Katuse tüüp	0,601767	-0,676361	0,126562
Substraadi paksus	0,420210	-0,468552	0,054418
Katuse vanus	-0,059095	0,201700	-0,100619
Katuse kalle	0,268121	-0,431291	0,146103
Õhutemp 2 nädalat enne	0,354577	-0,030473	0,247560
Õhutemp 1 nädal enne	0,293498	0,049939	0,189647
Õhutemp 24 h enne	0,336059	0,024294	0,195259
Õhutemp mõõtepäeval	0,148699	0,081067	0,021847
Substraadi temperatuur	0,035271	0,131545	0,172624
Sademed 2 nädalat enne	0,411264	-0,143204	0,307139
Sademed 1 nädal enne	0,358895	-0,048863	0,309807
Sademed 24 h enne	0,286076	-0,076653	0,243330
Suhteline niiskus 2 nädalat enne	0,172844	-0,097036	-0,086090
Suhteline niiskus 1 nädal enne	0,400086	-0,139866	0,060995
Suhteline niiskus 24 h enne	0,313126	-0,172411	0,078250
Päikesekiirgus 1 nädal enne	-0,121353	0,030860	0,038863
Päikesekiirgus 24 h enne	-0,107485	0,004993	-0,164887
Päikesepaiste kestus 1 nädal enne	-0,227393	-0,037076	-0,099216
Potentsiaalne ET 1 nädal enne	-0,077941	0,024296	0,051768
Potentsiaalne ET 24 h enne	-0,015436	-0,028590	-0,121043
Substraadi niiskus	0,607449	-0,349047	0,113986
Substraadi elektrijuhtivus	0,539591	-0,288769	0,126575

## 5. Arutelu

### 5.1. Mõõtmised staatilise suletud kambri meetodil

#### 5.1.1. Mõõtmisalade CO<sub>2</sub> vood

Süsihappegaasi emissioon mullast on mullaelustiku, sealhulgas mikroorganismide (bakterid, vetikad, seened, ainuraksed), makroorganismide (nematooidid, putukad, vihmaussid) ning taimejuurte bioloogilise aktiivsuse indikaatoriks (Asensio et al., 2007). Mulla temperatuur ning niiskussisaldus mõjutavad mikroorganismide ja taimejuurte aktiivsust, mõjutades seeläbi otseselt ka kasvuhoonegaaside emissiooni ja tarbimist (Smith et al., 2003). Mullaniiskust peetakse gaasiemissioone mõjutavatest mullaparametritest olulisimaks (Oertel et al., 2016). Substraadikihi niiskussisaldust mõjutavad peamiselt vihmajärgsed vihmaajad ning nende vahele jäävad kuivaperioodid. Harper jt (2005) leidsid rohumaa CO<sub>2</sub> voogusid uurides, et mullaniiskust mõjutasid nii sademete kogus kui ka vihmajärgse vihmaajade ajaline kestus. Vihmajärgsetel perioodidel suurenesid CO<sub>2</sub> vood ning pikematel kuivaperioodidel vood vähenesid (Harper et al., 2005). Wu jt (2010) leidsid muldade inkubeerimiskatses, et kuivatatud muldade CO<sub>2</sub> vood olid väga madalad ( $5 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), kuid koheselt peale niisutamist toimus märkimisväärne CO<sub>2</sub> voo suurenemine ( $50 \pm 5,7 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), mis järgnevatel päevadel järk-järgult vähenes ning muutus seejärel stabiilseks. Ka käesolevas töös leiti oluline korrelatsioon substraadikihi niiskussisalduse ning CO<sub>2</sub> voogude vahel (Tabel 2). Maikuus oli Rakvere matipõhise katuse keskmine niiskussisaldus  $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (subs. temp  $22^\circ\text{C}$ ) ning keskmiseks CO<sub>2</sub> vooks katusele mõõdeti  $14,1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Juunis aga oli keskmiseks niiskussisalduseks  $0,27 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (subs. temp  $22,2^\circ\text{C}$ ) ning keskmiseks CO<sub>2</sub> vooks  $59,1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (Joonis 5). Sarnaselt Rakvere katuse näitele suurenesid mõõteperioodil ka teiste haljaskatuste ning loodusliku kontrollala CO<sub>2</sub> vood substraadi niiskussisalduse suurenemisel. Kuna haljaskatused on suveperioodil pigem kuivad, siis suurendab substraadi niiskussisalduse tõus mikrobioloogilist aktiivsust ja seeläbi ka CO<sub>2</sub> emissioone.

Mitmed autorid on leidnud, et mulla CO<sub>2</sub> emissioonid suurenevad eksponentsiaalselt mulla temperatuuriga (Tang et al., 2003; Fang & Moncrieff, 2001; Reth et al., 2005). Wu jt (2010) leidsid, et temperatuuri suurenemisel algselt  $5^\circ\text{C}$  kuni  $15^\circ\text{C}$  kaasnes märkimisväärne CO<sub>2</sub> voo suurenemine mullast ( $P < 0,05$ ), mis oli tingitud mikrobioloogilise aktiivsuse kasvust ning seeläbi mulla orgaanilise aine kiiremast mineraliseerumisest. Frank jt (2002) leidsid Põhja-Dakota osariigis rohumaa CO<sub>2</sub> voogusid uurides, et suurimad CO<sub>2</sub> vood esinesid

mõõtekordadel, kus keskmised mullatemperatuurid olid vahemikus 20,2 – 22,8°C ning keskmised õhutemperatuurid vahemikus 24,6 – 25,8°C. Käesolevas töös substraadi temperatuuri ning CO<sub>2</sub> voogude vahel korrelatsiooni ei tuvastatud. Kogu mõõteperioodi vältel jäid keskmised 5 cm sügavusel mõõdetud mullatemperatuurid vahemikku 16,0 – 24,9°C. Seetõttu võib eeldada, et antud vahemikus ei kaasne substraadi temperatuuri muutumisega olulisi muutusi CO<sub>2</sub> voogudes. Samas esinesid seosed CO<sub>2</sub> voogude ning õhutemperatuuri vahel. Sellest võib eeldada, et suurem osa haljaskatuste mikrobioloogilisest aktiivsusest toimub pinnalähedastes kihtides ning on seetõttu rohkem mõjutatud õhutemperatuuri muutumisest.

Süsihappegaasi voogude seoseid õhutemperatuuri ning ka substraadi niiskussisalduse muutumisega mõõteperioodi jooksul on näha ka joonistelt 5 – 7. Maikuus, kus õhutemperatuurid olid valdavalt jahedad ning substraadi niiskussisaldus madal, olid madalamad ka CO<sub>2</sub> vood katustelt. Juunist augustini, kus õhutemperatuurid olid kõrgemad ning ka katuste niiskussisaldus võrreldes maikuuga tõusnud, saavutasid haljaskatused ning ka looduslik kontrollala mõõteperioodi CO<sub>2</sub> voogude maksimumid. Septembris kui õhutemperatuurid hakkasid järk-järgult langema, vähenesid märgatavalt ka katuste CO<sub>2</sub> vood ning jäid maikuuga võrreldavale tasemele. Sarnaseid tulemusi leiti ka rohumaade CO<sub>2</sub> voogude mõõtmisel, kus suurimad gaasivood esinesid juulis ja augustis ning langesid septembris (Harper et al., 2005).

Oluline seos tuvastati katuse tüübi ja CO<sub>2</sub> voogude vahel (Tabel 2). Suurimateks süsihappegaasi emiteerijateks haljaskatustest olid mullapõhise substraadiga haljaskatused, mati- ja kergkruusapõhised katused jäid CO<sub>2</sub> voogudelt omavahel sarnasesse vahemikku (Joonis 4). Mullapõhiste haljaskatuste substraadikiht on võrreldes kergkruusakatustega ja matipõhiste katustega enamasti tusedam ning oluliselt tihedama struktuuriga, mis tagab ühtlasema niiskus- ja temperatuurirežiimi substraadikihi sees. Tänu paksemale ja tihedamale substraadikihile on mullapõhistel haljaskatustel väiksem oht suveperioodil temperatuuri- ja niiskusstressi tekkimiseks substraadikihi sees, mis võiks mikrobioloogilist aktiivsust oluliselt pärssida. Katuse omadustest esines seos ka katuse kaldega. Kaldega katuste puhul olid CO<sub>2</sub> vood suuremad kui lamedate katuste puhul. Kaldega katuste puhul on väiksem tõenäosus vihmasadude ajal liigniiskete tingimuste tekkimiseks. Liigniiskuse tingimustes väheneb veega täidetud pooriruumide tõttu mulla aereeritus, mis inhibeerib mullahingamist ning seetõttu vähenevad ka CO<sub>2</sub> vood (Smith et al., 2003; Falk et al., 2005). Haljaskatuste vanuse ning CO<sub>2</sub> voogude vahel korrelatsiooni ei leitud, millest võib järeldada, et mullahingamise aktiivsus ei

ole seotud katuse substraadikihi vanusega, vaid pigem muude teguritega nagu paksus, drenitus, tihedus ja toitainete sisaldus.

### **5.1.2. Mõõtmisalade CH<sub>4</sub> vood**

Metaani tekib anoksilistes keskkondades, sealhulgas liigniisketes muldades metanogeenide poolt orgaanilise aine lagundamisel. Metaani tarbijateks on mulla aeroobsetes piirkondades elavad metanotroofsed mikroorganismid, kes oksüdeerivad energia ja süsiniku saamise eesmärgil atmosfäärset metaani (Le Mer & Roger, 2001). Oluliste metaanivoogusid reguleerivate teguritena on välja toodud mulla niiskussisaldus, mulla poorsus ja struktuur, temperatuur ning pH (Topp & Pattey, 1997). Liiga kuiva mulla puhul on metanotroofsete bakterite aktiivsus inhibeeritud, samas on ka liigniisked tingimused tänu takistatud gaaside difusioonile metanotroofide jaoks inhibeerivad ning seetõttu langeb mõlemal juhul metaani oksüdeerimise intensiivsus (Chanton et al., 2011).

Haljaskatuste metaanivoog oli negatiivselt seotud katuse CO<sub>2</sub> vooga (Tabel 2). Antud seos on loogiline, sest mullahingamine toimub aeroobsetes tingimustes, mistõttu toimub ka metaani oksüdeerimine aeroobsete metanotroofide poolt ning seeläbi metaani kontsentratsioon kahaneb. Negatiivsed seosed esinesid ka katuse tüübi ning erinevate katuse parameetrite, nagu kalde ja substraadikihi paksuse vahel. Paksema ning tihedama substraadikihi, näiteks mulla puhul on stabiilsemad niiskus- ja temperatuuritingimused mikrobioloogilise aktiivsuse jaoks soosivamad kui seda õhukese kergkruusakihi puhul. Negatiivne oli ka seos mulla niiskussisaldusega, mida võib selgitada asjaoluga, et aeroobses ja võrdlemisi kuivas keskkonnas kaasneb mullaniiskuse suurenemisega mikrobioloogilise aktiivsuse kasv, sealhulgas ka metanotroofsete bakterite aktiivsus.

Viie mõõtekuu kokkuvõtlikud tulemused näitasid, et praktiliselt kõik uuringu valimisse kuulunud haljaskatused ning ka looduslik kontrollala käitusid suuremal või vähemal määral metaani oksüdeerijatena, mis võib olla tingitud sellest, et haljaskatuste substraadikiht on suveperioodil tavatingimustel pigem kuiv ja seeläbi ka hästi aereeritud, mistõttu on metaani oksüdeerimine substraadikihis domineerivaks protsessiks. (Joonis 8). Katuste puhul olid suurimateks oksüdeerijateks mullapõhised haljaskatused, mati- ja kergkruusapõhiste haljaskatuste puhul olid tulemused madalamad ning jäid omavahel samasse suurusjärku. Mõõteperioodi suurimaks metaani oksüdeerijaks oli Uusküla mullapõhine haljaskatus, kus

metaanivoo mediaanväärtuseks mõõdeti  $-35,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (Joonis 8). Katustest oli teine suurim oksüdeerija Mägede garaaži haljaskatus,  $\text{CH}_4$  mediaanvooga  $-26,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Mõlema katuse puhul on tegu mullapõhiste haljaskatustega ning konkreetsete katuste puhul on substraadid liivakad ja kuivad. Naage loodusliku kontrollala metaanivoo mediaanväärtuseks oli  $-34,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Sarnaseid tulemusi näitas Kammann jt (2001) hooldatud rohumaid käsitlev uuring, kus suveperioodi kuivematel mõõtealadel olid tavapärasteks metaani oksüdeerimismääradeks  $25 - 35 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Mati- ja kergkruusapõhiste haljaskatuste metaanivoogude vaatlemisel kuude kaupa on näha, et esines ka mõningaid  $\text{CH}_4$  emissioonipiike, näiteks Palamuse matipõhisel katusel juunis ( $3,7 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) (Joonis 9) ning Maaülikooli kergkruusakatusel juulis ( $0,3 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) (Joonis 10). Nimetatud mõõtekordadel olid mõlema katuse puhul maksimaalsed ka  $\text{CO}_2$  vood. Mõõtekordadele olid eelnenuid sajuperioodid ning metaani emissioone saab seletada niiskussisalduse suurenemisel tekkinud anaeroobsete piirkondadega substraadikihi sees, mis tekitasid metanogeenidele soositud keskkonna. Samuti võib põhjuseks olla ka sajujärgne mullahingamise intensiivistumine, mille tulemusel langes hapniku kontsentratsioon substraadikihis ning tekkisid anaeroobsed tsoonid.

### 5.1.3. Mõõtmisalade $\text{N}_2\text{O}$ vood

Mullas tekib naerugaasi nitrifikatsiooni- ja denitrifikatsiooniprotsesside tulemusel, millest peetakse olulisemaks denitrifikatsiooni. Denitrifikatsiooni viivad läbi anaeroobsed denitrifitseerivad bakterid, kes redutseerivad substraadis leiduvat nitraati ( $\text{NO}_3^-$ ) või nitritit ( $\text{NO}_2^-$ ) lämmastikoksiidiks ( $\text{NO}$ ), dilämmastikoksiidiks ( $\text{N}_2\text{O}$ ) või molekulaarseks lämmastikuks ( $\text{N}_2$ ). Denitrifitseerivad bakterid on samas võimelised ka naerugaasi siduma, redutseerides  $\text{N}_2\text{O}$  molekulaarse lämmastiku kujule ( $\text{N}_2$ ) ning seeläbi võivad mullad käituda ka naerugaasi neeldajatena. See, kas mullad käituvad  $\text{N}_2\text{O}$  allikatena või neeldajatena sõltub mulla omadustest. Kui mineraalne lämmastik on vabalt kättesaadav, on  $\text{N}_2\text{O}$  redutseerimine  $\text{N}_2$  kujule vähetõenäoline.  $\text{N}_2\text{O}$  redutseerimine molekulaarseks lämmastikuks sõltub muuhulgas temperatuurist ning mulla pH-st (Firestone & Davidson, 1989; Syakila et al., 2010). Oluline on ka mullaniiskus, mis mõjutab hapniku difusiooni ning ammooniumi ( $\text{NH}_4^+$ ) ja nitraadi ( $\text{NO}_3^-$ ) kättesaadavust (Carter et al., 2011).

Haljaskatuste naerugaasivoog oli positiivses seoses  $\text{CO}_2$  voogudega, mille põhjuseks võib pidada hapniku kontsentratsiooni vähenemist substraadis tänu mullahingamise aktiivsuse

kasvule ning seeläbi anaeroobsete piirkondade tekkimist substraadi sees (Tabel 2). Samuti esines positiivne seos  $N_2O$  voogude ning sademete vahel. Seda võib seletada vihmaadade järgselt substraadikihi tekkinud anaeroobsete piirkondadega, kus saab toimuda denitrifitseerimine. Seosed esinesid ka õhutemperatuuriga ning katuse kaldega. Kuivas ja aeroobses keskkonnas suureneb õhutemperatuuriga mullahingamise intensiivsus ning seetõttu väheneb hapniku kontsentratsioon sügavamal substraadikihi sees, tekitades lokaalseid anaeroobseid tsoone, mis võivad tagada sobivad tingimused denitrifitseerijatele.

Viie mõõtekuu kokkuvõtlikud tulemused ei näidanud erinevate katusetüüpide  $N_2O$  voogude vahel märkimisväärsed erinevusi.  $N_2O$  mediaanväärtused jäid vahemikku  $3,2 \mu g N m^{-2} h^{-1}$  (Loomaaed-03) kuni  $-0,8 \mu g N m^{-2} h^{-1}$  (TÜTI) (Joonis 12). Madalad naerugaasi mediaanvood mõõteperioodi jooksul võivad olla tingitud katuste kuivast keskkonnast ning katuste madalast lämmastiku sisaldusest (Lisa 3, Tabel 4). Matipõhiste katuste puhul olid suurimad  $N_2O$  vood Rakvere katusel juunis ( $1,75 \mu g N m^{-2} h^{-1}$ ) ning Palamuse katusel augustis ( $2,4 \mu g N m^{-2} h^{-1}$ ) (Joonis 13). Mõlema katuse puhul eelnes mõõtmisele suurem sajuperiood, mistõttu võisid katuse substraadikihi sees tekkida anaeroobsed punktid. Kogu mõõteperioodi suurim naerugaasi emissioon oli Loomaaed-03 katusest, milleks oli  $18,4 \mu g N m^{-2} h^{-1}$  (Joonis 15). Vahetult enne mõõtmist oli samuti suurem sajuperiood (24 h varem 21,6 mm), mistõttu tekkisid anaeroobsed piirkonnad, samuti oli samal mõõtekorral  $CO_2$  voog katusest maksimaalne ning seetõttu võib väita, et ka hapniku kontsentratsioon oli substraadikihi oluliselt vähenenud. Loomaaed-03 katuse ning teiste mullapõhise substraadiga katustel on tänu paksemale ja tihedamale substraadikihi suurem tõenäosus vihmaadade järgselt anaeroobsete kollete tekkimiseks. Kergkruusakatustel aga esines peaaegu kõikidel mõõtekuudel negatiivseid  $N_2O$  vooge, millest võib eeldada, et denitrifikatsiooniprotsess viiakse antud katustel lõpuni (Joonis 14). Kergkruusaterade ühest otsast suletud poorides võib esineda anaeroobseid tingimusi, kus denitrifitseerijad redutseerivad  $N_2O$  molekulaarseks lämmastikuks. Ka jooniselt 23 on näha, et kõikide kergkruusapõhiste katuste substraadiproovidest mõõdetud  $N_2$  sisaldused on oluliselt kõrgemad kui teiste katusetüüpide puhul.

## 5.2. Haljaskatuste süsiniku bilanss mõõtmisperioodil

Haljaskatustel on süsihappegaasi sidujateks katusel kasvavad taimed. Tänu sellele omadusele võivad haljaskatused potentsiaalselt vähendada ümbritseva piirkonna välisõhus märkimisväärselt CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni (Li et al., 2010). Mitmed autorid on leidnud, et haljaskatusel kasvavate taimede võimekus süsihappegaasi sidumiseks erineb liigiti märkimisväärselt (Agra et al., 2017; Ismail et al., 2012). Tingimused taimekasvuks haljaskatusel on keerulised, sest taimestik peab taluma ekstreemseid temperatuure, põuatingimusi ning tuult (Getter et al., 2009; Getter & Rowe, 2008). Tänu substraadikihi väiksele paksusele ning heale drenitusele on liigne kuivus ning sellega kaasnev veestress haljaskatustel põhiliseks taimekasvu limiteerivaks teguriks (Rowe et al., 2012; Thuring et al., 2010). Üldjuhul aitab paksem substraadikiht paremini taimi ekstreemsete temperatuuride eest kaitsta ning parandada vee kättesaadavust. Seetõttu kaasneb paksema substraadikihiga enamasti ka laiem taimevalik (Thuring et al., 2010). Kukeharjad (*Sedum*) on üheks haljaskatuste levinumaks taimeliigiks. Kukeharjad on sageli eelistatud, sest nad suudavad kasvada õhukeses substraadikihis ja otsese päikese tingimustes. Samuti on kukeharjad hea põuataluvusega ning laia katvusega, levides kiiresti üle katuse (Nagase & Dunnett, 2010; Getter et al., 2009; Getter & Rowe, 2008). Üheks kukeharjade kohastumuseks on tugevates põuatingimustes muuta oma fotosünteesirada selliselt, et päeval ajal hoiab taim evapotranspiratsiooni piiramiseks ning vee säilitamiseks oma õhulõhesid suletuna ning seob atmosfäärses CO<sub>2</sub> pimedal ajal kui õhutemperatuur on madalam. Sellist fotosünteesirada nimetatakse CAM-rajaks (*Crassulacean acid metabolism*) (Habibi & Hajiboland, 2012; Nagase & Dunnett, 2010). Peale kukeharjade on katustel levinud ka mitmesugused põuatingimusi taluvad rohttaimed, mis on aga substraadi paksuse ning niiskussisalduse suhtes nõudlikumad.

Taimede süsiniku sidumise võimet on haljaskatuste puhul uuritud peamiselt läbi taimede biomassi muutuse (nt: Whittinghill et al., 2014), kuid süsihappegaasi sidumise hindamist otseste mõõtmistega, nagu tehti ka käesolevas töös, on varem tehtud vaid vähesel määral. Agra jt (2017) leidsid, et võrreldes ristikuga (*Trifolium*) oli kukeharjade CO<sub>2</sub> sidumise võime hinnanguliselt kuni viis korda madalam, mida seostati kukeharjataimede fotosünteesimise eripäraga (Joonis 3). Autorid järeldasid, et CO<sub>2</sub> sidumise seisukohast ei ole vaid kukeharjadega haljastatud katused eelistatud ning kukeharjade kõrvale tuleks lisada ka suurema sidumisvõimega üheaastaseid taimi (Agra et al., 2017).

Käesolevas töös leiti, et kõikide katusetüüpide puhul ning ka looduslikul võrdluslalal ületas ökosüsteemi hingamine ning sellega kaasnev CO<sub>2</sub> emissioon enamikel mõõtekuudel taimestiku poolt seotud CO<sub>2</sub> koguse (mõõdetud koos mullahingamisega) ning seetõttu käitusid katused kokkuvõttes CO<sub>2</sub> emiteerijatena (Joonis 16, 17). Joonistelt 18 – 20 on näha, et CO<sub>2</sub> sidumine jälgib temperatuuri ja niiskustingimuste muutumist mõõteperioodi jooksul. Mais, kus õhutemperatuurid olid madalamad ning niiskussisaldus substraadikihis samuti madal, toimus reeglina süsihappegaasi emiteerimine. Õhutemperatuuride ning niiskussisalduse tõustes hoogustus järgnevatel kuudel taimekasv, millega suurenes märgatavalt ka sidumine, saavutades maksimumi üldjuhul vegetatsiooniperioodi hilisemas faasis. Matipõhistel ja kergkruusapõhistel katustel toimus maksimaalne sidumine enamike katuste puhul septembris, mullapõhise substraadiga katustel oli varieeruvus suurem (Joonis 18, 19). Katusetüüpidest olid mõõteperioodil suurimateks sidujateks üldjuhul mullapõhise substraadiga haljaskatused, millest omakorda suurim siduja oli Mägede garaaži katus (Joonis 17). Matipõhise ja kergkruusapõhise substraadikihiga katused näitasid mõõteperioodil omavahel sarnaseid tulemusi. Mullapõhistel katustel võib suuremat süsihappegaasi sidumist seletada paksema ja tihedama substraadikihiga, mis tagab taimedele parema vee kättesaadavuse. Samuti on mullapõhistel haljaskatustel üldjuhul taimkatte osakaal suurem ning ühtlasem kui kergkruusavõi matipõhistel katustel ning taimedeks on valdavalt suurema kasvuga ning parema süsihappegaasi sidumisvõimega rohttaimed (Lisa 2).

Dünaamilise kambri viie kuu mõõtetulemuste põhjal arvutati välja haljaskatuste ning loodusliku kontrollala hinnanguline netoprimaarproduktioon (NPP) ühe aasta kohta (Joonis 21). Netoprimaarproduktioon erines mõõtealade lõikes märkimisväärselt. Suurima produktiooniga oli Naage võrdlusala ( $-19,6 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ ), mis on loogiline tulemus, sest Naage võrdlusala puhul oli taimedega katvus suur, taimestik lopsakas ning mitmekesine (Lisa 2). Ka Naage taimekasvuks vajalike toitainete sisaldus (N,P,K) mullas on võrreldes mitmete haljaskatuste, näiteks kergkruusapõhiste katustega märkimisväärselt suurem (Lisa 3). Madalaima väärtusega oli Maaülikooli kergkruusapõhine katus ( $-2,4 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ ). Maaülikooli katuse puhul esines piirkondi, kus taimkate puudus täielikult. Taimestik katusel oli fragmenteerunud ning seetõttu ka katvus ebahühtlane. Kergkruusakatuste puhul on substraadikihi niiskussisaldus suveperioodil sageli väga madal ning seetõttu suudavad seal toime tulla vaid pidevaid põuatingimusi taluvad taimed (*Sedum*), mis on võrdlemisi madala fotosünteesilise aktiivsusega (Agra et al., 2017). Ka Uusküla katuse puhul oli märgata madalat NPP väärtust ( $-3,3 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ ), kuigi tegemist oli mullapõhise ning paksema



substraadikihi katusega. Uusküla katuse puhul moodustasid valdava osa katuse taimkattest erinevad samblad ja samblikud (põdrasamblik), rohttaimede osakaal oli madal ning seeläbi ka taimede poolt seotud süsiniku kogus väike. Kuigi Uusküla katuse NPP väärtus oli madal, olid mullapõhise substraadiga katused reeglina kolmest katusetüübist suurima netoprimaarproduktiooniga. Kokkuvõttes saab väita, et NPP seisukohast on oluline nii katuse taimestikuga katvus kui ka taimkatte koosseis. Katused, kus taimedega katvus on suur ning taimkate lopsakas, on suurema primaarproduktiooniga kui kidura ning hõreda taimestikuga haljaskatused.

### **5.3. Mõõtmisalade globaalse soojenemise potentsiaal (GWP)**

Viie mõõtekuu kasvuhoonegaaside voogude põhjal arvutati iga mõõteala kohta välja globaalse soojenemise potentsiaal (Joonis 22). Kolme haljaskatuse puhul oli aastane globaalse soojenemise potentsiaal positiivne (Iisaku, EMÜ, Uusküla) ning ülejäänud katuste ja Naage loodusliku võrdlusala puhul negatiivne. Iisaku matipõhise katuse puhul ületas kõikidel mõõtekuudel ökosüsteemi hingamine selgelt seotud süsihappegaasi koguse, mistõttu on Iisaku katuse puhul hinnanguline globaalse soojenemise potentsiaal positiivne (Joonis 18). Maaülikooli peahoone katuse puhul ületas samuti ökosüsteemi hingamine kõikidel kuudel süsihappegaasi sidumise (Joonis 19), samuti esines kahe mõõtekuu puhul N<sub>2</sub>O emiteerimist (mai, juuli) (Joonis 14). Uusküla mullapõhise katuse puhul ületas CO<sub>2</sub> sidumine vaid ühel mõõtekuul ökosüsteemi hingamise (september) (Joonis 20). Samuti esines Uusküla katuse puhul kolmel kuul viiest N<sub>2</sub>O emiteerimine (juuni, juuli, august) (Joonis 15).

## Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli hinnata kasvuhoonegaaside voogusid erinevat tüüpi ja erinevas vanuses haljaskatustelt, võrreldes neid omavahel ning loodusliku kontrollala gaasivoogudega. Samuti oli eesmärgiks hinnata, kuidas võivad erinevat tüüpi haljaskatused läbi sidumise või emiteerimise mõjutada piirkonna kasvuhoonegaaside bilanssi.

Mõõtmised viidi läbi 2016. aastal maist septembrini kord kuus. Magistritöö valimisse kuulus 14 erinevat tüüpi ning erinevas vanuses haljaskatust üle Eesti ning üks looduslikul paepealsel mullal asuv kontrollala. Haljaskatused jagati substraadikihi omaduste ning taimkatte põhjal kolme klassi: matipõhised katused, kergkruusapõhised katused ning mullapõhised katused.

Gaasivoogude mõõtmiseks kasutati pimekambri meetodit, katuste süsinikubilansi hindamiseks kasutati pleksiklaasist dünaamilist kambrit. Peale gaasivoogude mõõdeti igal mõõtmiskorral ka substraadikihi temperatuur ja niiskussisaldus. Neljandal mõõtekuul võeti substraadikihist keemiliste näitajate hindamiseks ka komposiitproov, mis analüüsiti Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituudi taimebiokeemia laboris.

Keskmisel süsihappegaasivood mõõtealade vahel erinesid seitsmekordselt. Mõõteperioodi suurimad süsihappegaasivood pärinesid Naage looduslikult kontrollalalt. Haljaskatustest olid suurimateks süsihappegaasi emiteerijateks mullapõhise substraadiga katused ning nendest omakorda suurima CO<sub>2</sub> vooga Loomaaed-03 katus. Mullapõhiste katuste suuremaid gaasivooge võib seletada paksema substraadikihiga, mis tagab mikrobioloogiliseks aktiivsuseks stabiilsema niiskus- ja temperatuurirežiimi. Mati- ning kergkruusapõhiste haljaskatuste CO<sub>2</sub> vood olid madalamad ning käitusid omavahel sarnaselt. Mõõteperioodi madalaimad vood pärinesid Maaülikooli kergkruusapõhiselt haljaskatuselt.

Suurem osa haljaskatustest ning ka looduslik kontrollala käitusid mõõteperioodi jooksul metaani oksüdeerijatena. Suurimaks metaani oksüdeerijaks oli Uusküla mullapõhine haljaskatus, millele järgnes Naage looduslik võrdlusala. Mullapõhised katused olid selgelt haljaskatustest suurimad metaani oksüdeerijad, mida võib seletada aeroobsete tingimustega ning mikrobioloogilist aktiivsust soosiva niiskus- ja temperatuurirežiimiga.

Naerugaasivood olid kõikidelt mõõtealadelt ühtlaselt madalad, keskmiselt 3,2 kuni -0,8 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Madalaid voogusid võib seletada haljaskatuste ning loodusliku mõõteala kasvukihis domineerivate aeroobsete tingimustega. Mõõtealade suurimad ühekordsed N<sub>2</sub>O emissioonid

olid seotud mõõtmistele eelnenud vihmasadudega ning seeläbi suurenenud niiskusest tekkinud ajutiste anaeroobsete piirkondade tekkega.

Dünaamilise kambri tulemustest selgus, et valdaval osal mõõtealadest ületas ökosüsteemi hingamine (ER) taimede poolt seotud süsihappegaasi hulga (NEE, koos mullahingamisega). Dünaamilise kambri tulemuste põhjal arvutati välja hinnanguline mõõtealade aastane netoproduktisioon, mis oli madalaima tulemusega kergkruusapõhise EMÜ puhul ja kõrgeima tulemusega loodusliku kontrollala puhul.

Dünaamilise kambri ning pimekambri tulemuste põhjal arvutati kõikide mõõtealade puhul välja globaalse soojenemise potentsiaal (GWP) ühe aasta kohta, mis oli valdavalt negatiivne. Vaid kolm katust olid positiivse globaalse soojenemise potentsiaaliga (Iisaku, EMÜ, Uusküla), mis tulenes sellest, et antud katuste puhul ületas ökosüsteemi hingamine sidumise ning seeläbi emiteeriti süsihappegaasi, samuti käitusid katused enamikel mõõtekuudel ka N<sub>2</sub>O emiteerijatena.

Kokkuvõtlikult tehti kogutud andmete põhjal järgnevad järeldused:

- Loodusliku kontrollalaga võrreldes pärinesid suurimad CO<sub>2</sub> vood mullapõhise substraadiga haljaskatustelt, mati- ja kergkruusapõhiste haljaskatuste vood erinesid üksteisest vaid vähesel määral;
- Haljaskatustest olid selgelt suurimad metaani oksüdeerijad mullapõhised haljaskatused, kergkruusakatused oksüdeerisid metaani vaid vähesel määral ning matipõhiste katuste metaanivoog oli nullilähedane;
- Naerugaasivood olid kõikide katuste puhul marginaalsed, üksikud kõrgemad emissioonid olid tingitud vihmaperioodidest;
- Haljaskatuste gaasivood olid tugevalt seotud katuste tüübiga, gaasivoogude ja katuse vanuse vahel olulisi seoseid ei leitud;
- Kõikide haljaskatuste ning ka kontrollala puhul ületas mõõteperioodil ökosüsteemi hingamine (ER) süsihappegaasi sidumise (NEE), kuid GWP arvutuse alusel toimivad enamik haljaskatuseid siiski kasvuhoonegaaside sidujana.

Tulevastes uuringutes tuleks dünaamilise kambriga hinnata mõõtealade süsinikuvoogusid erinevatel aastaegadel ning samuti hinnata mõõtealade CO<sub>2</sub> voogusid kogu ööpäeva lõikes ning täpsustavalt hinnata ka muutusi mõõtealade taimestiku biomassis.

## Summary

### Influence of roof type and age on greenhouse gas fluxes from green roofs

The aim of this study was to investigate fluxes of greenhouse gases from different green roof types of various ages, compare the fluxes with each other and to the fluxes from a natural reference area. The secondary objective was to estimate, how the gas fluxes from green roofs affect the balance of greenhouse gases in the surrounding area.

The measurements took place once a month from May 2016 to September 2016. Fourteen existing green roofs were selected and categorized into three main groups based on substrate type and vegetation: 1) green roofs with pre-grown sedum mats; 2) LWA-based (*LWA-lightweight aggregate*) green roofs; 3) soil-based green roofs. Also a natural reference area based on a limestone plain was included in this study.

Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O were measured from all sites using the closed chamber technique (Hutchinson & Livingston, 2003). The plastic collars for the opaque chambers were placed before and removed after each measurement cycle. In parallel with the opaque chambers a transparent Plexiglass chamber was used to measure the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) from the sites. In August composite soil samples were collected from all sites and analyzed for total carbon, total nitrogen, total sulfur, potassium, phosphorus, calcium, magnesium, ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) and organic matter content.

There was a sevenfold difference between the mean highest and lowest CO<sub>2</sub> fluxes from the measurement sites with the highest fluxes originating from the Naage natural reference site. Out of three green roof types the soil-based green roofs showed the highest CO<sub>2</sub> fluxes. Loomaaed-03 roof had the highest CO<sub>2</sub> flux of the soil-based roofs (med. 132,2 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). The higher CO<sub>2</sub> fluxes of soil-based roofs may be explained by more stable temperature and moisture conditions within the substrate owing to a thicker and denser substrate layer. The CO<sub>2</sub> fluxes from sedum mat green roofs and LWA-based roofs were similar with median values between 19,7 – 44,2 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

The majority of green roofs as well as the natural reference area functioned as net sinks of CH<sub>4</sub>. The biggest sink of CH<sub>4</sub> was Uusküla soil-based roof, followed by Naage reference area. The soil-based green roofs were clearly the highest sinks of CH<sub>4</sub> among the green roof types. This

may be explained by dominantly aerobic and more stable temperature and moisture conditions within the substrate of soil-based green roofs.

The N<sub>2</sub>O fluxes were equally low across the measurement period for all sites with mean values between 3,2 – –0,8 µg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. The low N<sub>2</sub>O fluxes may be explained by relatively low moisture content of the green roof substrate layer and therefore dominating aerobic conditions within the substrate layer which do not promote denitrification. The irregular peaks of N<sub>2</sub>O coincide with larger rain events which may promote the formation of anaerobic microsites within the substrate layer.

Net primary production (NPP) was calculated for all sites. It was greatest (i.e. most negative value) for the natural reference area and smallest (i.e. most positive value) for EMÜ LWA-based green roof.

The global warming potential for all sites was also calculated based on the data obtained from the five-month period. Most of the green roofs and the reference site showed negative GWP values. The only sites with positive GWP values were Iisaku sedum mat roof, EMÜ LWA-based roof and Uusküla soil-based roof. For these roofs the ecosystem respiration (ER) exceeded the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange values, EMÜ and Uusküla roofs were also net N<sub>2</sub>O sources.

Based on the results of this study it can be concluded:

- The biggest CO<sub>2</sub> fluxes originated from soil-based green roofs, the fluxes from sedum mat roofs and LWA-based roofs were similarly low;
- The biggest net sinks for CH<sub>4</sub> were soil-based green roofs, with LWA-based roofs showing slight sequestration potential and the fluxes for sedum mat roofs being close to zero;
- Mean N<sub>2</sub>O fluxes for all sites were insubstantial, irregular peaks of N<sub>2</sub>O coincided with larger rain events;
- The gas fluxes from green roofs were in strong correlation with roof type, the connection between roof age and greenhouse gas fluxes was not significant;
- Although ER exceeded NEE, most of the green roofs showed negative GWP values.

In the future seasonal and diurnal greenhouse gas fluxes from these sites should be measured. Plant biomass from these sites should also be analyzed to evaluate the full carbon sequestration potential.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada juhendajat Alar Teemuskit igati toetava ja mõistva suhtumise ning mitmekülgse abi eest käesoleva magistritöö koostamisel. Samuti sooviks tänada kõiki, kes aitasid magistritöö valmimisele kaasa. Nendeks olid professor Ülo Mander, Ain Kull, Martin Maddison, Mae Uri, Ivika Ostonen-Märtin ja Järvi Järveoja.

Suur tänu Tallinna Loomaaiale, SA Archimedesele, Ujula 2a ühistule, Eesti Maaülikoolile, Palamuse Vallavalitsusele, Iisaku Looduskeskusele, MLA Viimsi Lasteaed direktorile Maie Roosile ning Rakvere Eragümnaasiumi direktorile Anne Nõgule; samuti kolmele eraisikust katuseomanikule, kes andsid loa kasutada uuringus oma hoonete haljaskatuseid.

## **Kasutatud allikad**

**Agra, H. E., Klein, T., Vasl, A., Kadas, G., Blaustein, L. (2017).** Measuring the effect of plant-community composition on carbon fixation on green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 24, 1–4.

**Asensio, D., Penuelas, J., Llusia, J., Ogaya, R., Filella, I. (2007).** Interannual and interseasonal soil CO<sub>2</sub> efflux and VOC exchange rates in a Mediterranean holm oak forest in response to experimental drought. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(10), 2471–2484.

**Berardi, U. (2016).** The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*, 121, 217–229.

**Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., GhaffarianHoseini, A. (2014).** State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428.

**Berndtsson, J. C. (2010).** Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351–360.

**Bogner, J., Matthews, E. (2003).** Global methane emissions from landfills: new methodology and annual estimates 1980–1996. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2).

**Brenneisen, S. (2004).** Green roofs: How nature returns to the city. *Acta Horticulturae* 643, 289–293.

**Carter, M. S., Ambus, P., Albert, K. R., Larsen, K. S., Andersson, M., Priemé, A., van der Linden, L., Beier, C. (2011).** Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub>, prolonged summer drought and temperature increase on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes in a temperate heathland. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(8), 1660–1670.

**Chanton, J., Abichou, T., Langford, C., Spokas, K., Hater, G., Green, R., Goldsmith, D., Barlaz, M. A. (2011).** Observations on the methane oxidation capacity of landfill soils. *Waste Management*, 31(5), 914–925.

**Christen, A. (2014).** Atmospheric measurement techniques to quantify greenhouse gas emissions from cities. *Urban Climate*, 10, 241–260.

**Colla, S. R., Willis, E., Packer, L. (2009).** Can green roofs provide habitat for urban bees (Hymenoptera: Apidae)? *Cities and the Environment (CATE)*, 2(1), 4.

**Connelly, M., Hodgson, M. (2013).** Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. *Applied Acoustics*, 74(10), 1136–1143.

**Conrad, R. (1996).** Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, OCS, N<sub>2</sub>O, and NO). *Microbiological Reviews*, 60(4), 609–640.

**Dalal, R. C., Allen, D. E., Livesley, S. J., Richards, G. (2008).** Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. *Plant and Soil*, 309(1–2), 43–76.

**Dunnett, N., Kingsbury, N. (2004).** *Planting green roofs and living walls*. Timber Press, Portland.

**EEA. (2014).** Noise in Europe 2014. EEA Report No 10/2014. European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/noise-in-europe-2014>.

**Falk, M., Wharton, S., Schroeder, M. (2005).** Is soil respiration a major contributor to the carbon budget within a Pacific Northwest old-growth forest? *Agricultural and Forest Meteorology*, 135(1), 269–283.

**Fang, C., Moncrieff, J. B. (2001).** The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(2), 155–165.

**Famulari, D., Nemitz, E., Di Marco, C., Phillips, G. J., Thomas, R., House, E., Fowler, D. (2010).** Eddy-covariance measurements of nitrous oxide fluxes above a city. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(6), 786–793.

**Firestone, M. K., Davidson, E. A. (1989).** Microbiological basis of NO and N<sub>2</sub>O production and consumption in soil. Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, 47, 7–21.

**Frank, A. B., Liebig, M. A., Hanson, J. D. (2002).** Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology & Biochemistry*, 34(9), 1235–1241.

**Getter, K. L., Rowe, D. B. (2006).** The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276–1285.



**Getter, K. L., Rowe, D. B. (2008).** Media depth influences Sedum green roof establishment. *Urban Ecosystems*, 11(4), 361.

**Getter, K. L., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Wichman, I. S. (2011).** Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern US climate. *Energy and Buildings*, 43(12), 3548–3557.

**Getter, K. L., Rowe, D. B., Cregg, B. M. (2009).** Solar radiation intensity influences extensive green roof plant communities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8(4), 269–281.

**Grant, G. (2006).** Green roofs and façades. Berkshire, UK: IHS BRE Press.

**Grant, G., Engleback, L., Nicholson, B., Gedge, D., Frith, M., Harvey, P. (2003).** Green roofs: their existing status and potential for conserving biodiversity in urban areas. *English Nature Research Reports*, 498, 9–59.

**Gratani, L., Varone, L., Bonito, A. (2016).** Carbon sequestration of four urban parks in Rome. *Urban Forestry & Urban Greening*, 19, 184–193.

**Habibi, G., Hajiboland, R. (2012).** Comparison of photosynthesis and antioxidative protection in *Sedum album* and *Sedum stoloniferum* (Crassulaceae) under water stress. *Photosynthetica*, 50(4), 508–518.

**Hall, S. J., Huber, D., Grimm, N. B. (2008).** Soil N<sub>2</sub>O and NO emissions from an arid, urban ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G1).

**Harper, C. W., Blair, J. M., Fay, P. A., Knapp, A. K., Carlisle, J. D. (2005).** Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO<sub>2</sub> flux in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 11(2), 322–334.

**Hutchinson, G.L., Livingston, G.P. (1993).** Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. In: Harper, L.E., Mosier, A.R., Duxbury, J.M., Rolston, D.E. (eds.). *Agricultural Ecosystems Effects on Trace Gases and Global Climate Change*. ASA Special Publication No. 55. American Society of Agronomy, Madison, MI, USA, 1–55.

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014).** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Meyer, L.A. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

**Ismail, A., Samad, M. H. A., Rahman, A. M. A., Yeok, F. S. (2012).** Cooling potentials and CO<sub>2</sub> uptake of *Ipomoea Pes-caprae* installed on the flat roof of a single storey residential building in Malaysia. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 35, 361–368.

**Jaffal, I., Ouldboukhitine, S. E., Belarbi, R. (2012).** A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157–164.

**Jim, C. Y., Tsang, S. W. (2011).** Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, 46(6), 1263–1274.

**Järveoja, J., Peichl, M., Maddison, M., Teemusk, A., Mander, Ü. (2016).** Full carbon and greenhouse gas balances of fertilized and nonfertilized reed canary grass cultivations on an abandoned peat extraction area in a dry year. *GCB Bioenergy*, 8(5), 952–968.

**Kammann, C., Grünhage, L., Jäger, H. J., Wachinger, G. (2001).** Methane fluxes from differentially managed grassland study plots: the important role of CH<sub>4</sub> oxidation in grassland with a high potential for CH<sub>4</sub> production. *Environmental Pollution*, 115(2), 261–273.

**Kampa, M., Castanas, E. (2008).** Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151(2), 362–367.

**Kaye, J. P., McCulley, R. L., Burke, I. C. (2005).** Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems. *Global Change Biology*, 11(4), 575–587.

**Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., Hillman, T., Havránek, M., Hansen, Y., Pataki, D., Phdungsilp, A., Ramaswami, A., Villalba Mendez, G. (2009).** Greenhouse gas emissions from global cities. *Environmental Science and Technology* 43, 7297–7302.

**Le Mer, J., Roger, P. (2001).** Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology*, 37(1), 25–50.

**Li, J. F., Wai, O. W. H., Li, Y. S., Zhan, J. M., Ho, Y. A., Li, J., Lam, E. (2010).** Effect of green roof on ambient CO<sub>2</sub> concentration. *Building and Environment*, 45(12), 2644–2651.

**Liu, Y. K., Baskaran, A. (2005).** Using garden roof systems to achieve sustainable building envelopes. *National Research Council Canada, Construction Technology Update No. 65*.

**Loftfield, N., Flessa, H., Augustin, J., Beese, F. (1997).** Automated gas chromatographic system for rapid analysis of the atmospheric trace gases methane, carbon dioxide, and nitrous oxide. *Journal of Environmental Quality*, 26, 560–564.

**Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., Amatya, D.M. (2005).** A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *Journal of American Water Resources Association*, 41(3), 621–633.

**Magill, J.D., Midden, K., Groninger, J., Therrell, M. (2011).** A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research. *Research Papers. Paper 91*. [http://opensiuc.lib.siu.edu/gs\\_rp/91?utm\\_source=opensiuc.lib.siu.edu%2Fgs\\_rp%2F91&utm\\_medium=PDF&utm\\_campaign=PDFCoverPages](http://opensiuc.lib.siu.edu/gs_rp/91?utm_source=opensiuc.lib.siu.edu%2Fgs_rp%2F91&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages)

**Mander, Ü., Kuusemets, V., Lõhmus, K., Mäuring, T., Teiter, S., Augustin, J. (2003).** Nitrous oxide, dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Water Science and Technology* 48, 135–142.

**Matthews, T., Lo, A. Y., Byrne, J. A. (2015).** Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners. *Landscape and Urban Planning*, 138, 155–163.

**McIntyre, L., Snodgrass, E. C. (2010).** *The green roof manual: a professional guide to design, installation, and maintenance.* Timber Press.

**Moriwaki, R., Kanda, M. (2004).** Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area. *Journal of Applied Meteorology*, 43(11), 1700–1710.

**Nagase, A., Dunnett, N. (2010).** Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: effects of watering and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 97(4), 318–327.

**Nagase, A., Dunnett, N. (2012).** Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, 104(3), 356–363.

**Nakagawa, F., Tsunogai, U., Komatsu, D. D., Yamada, K., Yoshida, N., Moriizumi, J., Nagamine, K., Iida, T., Ikebe, Y. (2005).** Automobile exhaust as a source of <sup>13</sup>C- and D-enriched atmospheric methane in urban areas. *Organic Geochemistry*, 36(5), 727–738.

**Ng, E., Chen, L., Wang, Y., Yuan, C. (2012).** A study on the cooling effects of greening in a high-density city: an experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 47, 256–271.

**Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., Mihalakakou, G. (2001).** Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7), 719–729.

**Nowak, D. J. (1994).** Air pollution removal by Chicago's urban forest. *Chicago's urban forest ecosystem: Results of the Chicago urban forest climate project*, 63–81.

**Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Rowe, B. (2007).** Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), 823–833.

**Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., Erasmi, S. (2016).** Greenhouse gas emissions from soils – A review. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 76(3), 327–352.

**Onmura, S., Matsumoto, M., Hokoi, S. (2001).** Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Energy and Buildings*, 33(7), 653–666.

**Parkins, K. L., Clark, J. A. (2015).** Green roofs provide habitat for urban bats. *Global Ecology and Conservation*, 4, 349–357.

**Peck, S. W., Callaghan, C., Kuhn, M. E., Bass, B. (1999).** Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada. *Canada Mortgage and Housing Corporation*.

**Phillips, N. G., Ackley, R., Crosson, E. R., Down, A., Hutya, L. R., Brondfield, M., Karr, J.D., Zhao, K., Jackson, R. B. (2013).** Mapping urban pipeline leaks: Methane leaks across Boston. *Environmental Pollution*, 173, 1–4.

**Raich, J. W., Schlesinger, W. H. (1992).** The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44(2), 81–99.

**Reth, S., Reichstein, M., Falge, E. (2005).** The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO<sub>2</sub> efflux—A modified model. *Plant and Soil*, 268(1), 21–33.

**Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., Liu, C. (2008).** A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20, 120–128.

**Rowe, D. B., Getter, K. L., Durhman, A. K. (2012).** Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years. *Landscape and Urban Planning*, 104, 310–319.

**Santamouris, M. (2014).** Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703.

**Satterthwaite, D. (2008).** Cities' contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Environment and Urbanization*, 20(2), 539–549.

**Savio, P., Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Slosberg, R. B. (2006).** Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. New York City regional heat island initiative. The New York State Energy Research and Development Authority.

**Smith, K. A., Ball, T., Conen, F., Dobbie, K. E., Massheder, J., Rey, A. (2003).** Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 54(4), 779–791.

**Spala, A., Bagiorgas, H. S., Assimakopoulos, M. N., Kalavrouziotis, J., Matthopoulos, D., Mihalakakou, G. (2008).** On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy*, 33(1), 173–177.

**Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., Smith, C. L. (2012).** Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmospheric Environment*, 61, 283–293.

**Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., Smith, C. L. (2013).** Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of the Total Environment*, 461, 28–38.

**Stovin, V., Vesuviano, G., Kasmin, H. (2012).** The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414, 148–161.

**Syakila, A., Kroeze, C., Slomp, C. P. (2010).** Neglecting sinks for N<sub>2</sub>O at the Earth's surface: does it matter? *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 7(S1), 79–87.

**Tang, J., Baldocchi, D. D., Qi, Y., Xu, L. (2003).** Assessing soil CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> profiles in soils with small solid-state sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118(3), 207–220.

**Teemusk, A. (2005).** Murukatuse temperatuuri reguleerimise ja vee kinnipidamise võime Eesti kliimatingimustes. Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal. Tartu Ülikool Geograafia instituut.

**Teemusk, A., Mander, Ü. (2009).** Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia. *Building and Environment*, 44(3), 643–650.

**Theodosiou, T. (2009).** Green roofs in buildings: Thermal and environmental behaviour. *Advances in Building Energy Research*, 3(1), 271–288.

**Thuring, C. E., Berghage, R. D., Beattie, D. J. (2010).** Green roof plant responses to different substrate types and depths under various drought conditions. *HortTechnology*, 20(2), 395–401.

**Topp, E., Pattey, E. (1997).** Soils as sources and sinks for atmospheric methane. *Canadian Journal of Soil Science*, 77(2), 167–177.

**Trumbore, S. (2006).** Carbon respired by terrestrial ecosystems—recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 12(2), 141–153.

**Van Renterghem, T., Botteldooren, D. (2008).** Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. *Journal of Sound and Vibration*, 317(3), 781–799.

**Van Renterghem, T., Botteldooren, D. (2011).** In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs. *Building and Environment*, 46(3), 729–738.

**Velasco, E., Roth, M. (2010).** Cities as net sources of CO<sub>2</sub>: Review of atmospheric CO<sub>2</sub> exchange in urban environments measured by eddy covariance technique. *Geography Compass*, 4(9), 1238–1259.

**Vijayaraghavan, K. (2016).** Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740–752.

**Voyde, E., Fassman, E., Simcock, R. (2010).** Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 394(3), 384–395.

**Whittinghill, L. J., Rowe, D. B., Schutzki, R., Cregg, B. M. (2014).** Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. *Landscape and Urban Planning*, 123, 41–48.

**Wu, X., Yao, Z., Brüggemann, N., Shen, Z. Y., Wolf, B., Dannenmann, M., Zheng, X., Butterbach-Bahl, K. (2010).** Effects of soil moisture and temperature on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> soil–atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 773–787.

**Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., Petrichenko, K. (2015).** Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85–98.

**Yang, J., Yu, Q., Gong, P. (2008).** Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 42(31), 7266–7273.



## **Lisa 1. Uurimuses käsitletud haljaskatused ja kontrollala**



**Joonis 24.** Rakvere Eragümnaasiumi algkoolihoone mattkatus.



**Joonis 25.** Palamuse vallamaja mattkatus.





**Joonis 26.** Iisaku Looduskeskuse mattkatus.



**Joonis 27.** Viimsi Lasteaia Pargi maja kergkruusapõhine haljaskatus.





**Joonis 28.** SA Archimedese kergkruusapõhine haljaskatus.



**Joonis 29.** Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi kergkruusapõhine haljaskatus.





**Joonis 30.** Eesti Maaülikooli peahoone kergkruusapõhine haljaskatus.



**Joonis 31.** Tallinna Loomaaia alpinaariumi 2003. a. rajatud mätaskatus.





**Joonis 32.** Tallinna Loomaaia alpinaariumi 2008. a. rajatud mätaskatus.



**Joonis 33.** Mägede külas asuva kuur-garaažihoone mätaskatus.





**Joonis 34.** Mägede külas asuva keldrihoone mätaskatus.



**Joonis 35.** Haanja vallas asuva külalistehoone mätaskatus.





**Joonis 36.** Uuskülas asuva eluhoone mätaskatus.



**Joonis 37.** Tartu Ujula Konsumi terrass-rohukatus.





**Joonis 38.** Looduslik kontrollala Naage loopealne.

## Lisa 2. Mõõtmisalade taimede osakaalud

**Tabel 3.** Mõõtmisrõngaste taimede osakaalud: samblad-samblikud/rohttaimed/paljas (%).

Uurimisala	Rõngas 1	Rõngas 2	Rõngas 3
Rakvere taimemattkatus	40/40/20	40/40/20	40/40/20
Palamuse taimemattkatus	70/30/0	85/15/0	80/20/0
Iisaku taimemattkatus	90/10/0	70/30/0	70/30/0
Viimsi kergkruusapõhine katus	25/25/50	30/50/20	35/35/30
Archimedese kergkruusapõhine katus	30/50/20*	60/20/20	50/30/20
TÜTI kergkruusapõhine katus	70/30/0	70/30/0	80/20/0
EMÜ kergkruusapõhine katus	60/5/35	50/10/40	30/20/50
Loomaaed-03 mullapõhine katus	40/60/0	40/60/0	40/60/0
Loomaaed-08 mullapõhine katus	80/20/0	75/25/0	70/30/0
Mägede garaaži mullapõhine katus	70/30/0	70/30/0	70/30/0
Mägede keldri mullapõhine katus	70/30/0	70/30/0	70/30/0
Haanja mullapõhine katus	50/50/0	50/50/0	50/50/0
Uusküla mullapõhine katus	90/10/0	90/10/0	90/10/0
Ujula savi-mullapõhine terrass-rohukatus	50/50/0	50/50/0	50/50/0
Naage looduslik võrdlusala (loopealne)	60/40/0	60/40/0	70/30/0

\*maikuu mõõtmisel asus rõngas teises kohas



### Lisa 3. Komposiitproovi mullakeemia tulemused

**Tabel 4.** Komposiitproovi mullakeemia tulemused.

	<b>pH KCl</b>	<b>TC %</b>	<b>TN %</b>	<b>NO<sub>3</sub>-N mg/kg</b>	<b>NH<sub>4</sub>-N mg/kg</b>	<b>P mg/kg</b>	<b>K mg/kg</b>	<b>Mg mg/kg</b>	<b>Ca mg/kg</b>	<b>TS %</b>	<b>Org. aine %</b>
<b>R</b>	7,2	9,8	0,68	2,26	4,7	60	46	140	5100	0,096	15
<b>P</b>	7,7	4,2	0,17	1,9	3,7	59	46	110	2300	0,031	3,9
<b>I</b>	7,4	6,8	0,27	<0,01	3,6	77	36	160	3200	0,060	7,0
<b>V</b>	7,8	1,0	0,07	1,7	5,3	100	66	160	540	0,027	1,4
<b>A</b>	7,7	1,9	0,14	0,020	5,0	27	79	110	1200	0,080	2,3
<b>T</b>	7,4	1,8	0,12	0,01	7,5	157	100	160	790	0,043	2,9
<b>M</b>	7,8	1,1	0,05	0,013	2,8	44	79	110	1000	0,031	1,2
<b>L3</b>	7,1	5,5	0,44	1,5	2,3	249	66	160	2700	0,024	6,5
<b>L8</b>	7,7	2,9	0,13	0,47	2,0	201	110	57	2300	0,020	2,9
<b>MG</b>	6,2	1,5	0,09	1,1	2,0	62	22	13	470	0,018	2,0
<b>MK</b>	7,0	1,8	0,10	0,12	1,6	64	10	5,8	710	0,014	1,9
<b>H</b>	4,6	4,2	0,19	0,20	2,7	34	87	70	370	0,029	2,7
<b>U</b>	4,6	1,5	0,08	0,84	8,6	8,7	15	11	180	0,010	2,7
<b>UK</b>	7,0	5,2	0,41	1,8	3,5	107	130	90	2500	0,034	6,9
<b>N</b>	6,3	11	0,90	0,07	3,3	175	100	160	4200	0,065	16

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Kert Keller,

(Sünniaeg: 25.12.1990)

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Haljaskatuste gaasivoo sõltuvus katuse tüübist ja vanusest“,

mille juhendaja on PhD Alar Teemusk,

reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 23.05.2017